

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

2006

Tomáš Nedvídek

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 - Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 - Automatické řízení a inženýrská informatika

## **Analýza hlavových opěrek z hlediska vibrací a hluku**

Vibration and noise analyse of head rest

### **Diplomová práce**

Autor:

**Tomáš Nedvídek**

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Ivan Jaksch, CSc.

Konzultant:

Ing. Petr Fuchs

Ing. Zdeněk Flégr, Bühler Motor

**V Liberci 17.5.2006**

Tuto stránku nahradí oficiální zadání

**Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultanty.

V Liberci 17.5.2006

Podpis



Chtěl bych tímto poděkovat Doc. Ing. Ivanu Jakschovi, CSc. a Ing. Petru Fuchsovi zejména za jejich odbornou pomoc a rady, které mi byly cennými informacemi při vypracovávání diplomové práce. Dále děkuji Ing. Zdeňku Flégrovi z firmy Bühler Motor Hradec Králové za rady, cenné připomínky a poskytnuté podklady pro řešení diplomové práce.

## Abstrakt

Má práce se zabývá měřením vibrací a hluku elektrického pohonu hlavových opěrek automobilů BMW řady 5, 7 a X5. Měření bylo prováděno multianalizátorem PULSE firmy Brüel & Kjaer, se kterým byly propojeny měřicí prostředky: akcelerometr, mikrofón a proudová sonda. Dále se práce zabývá analýzou frekvenčních spekter a jejich vzájemných souvislostí v obou směrech řízení s různými stupni zátěže. Stejně tak je práce zaměřena na analýzu spekter jednotlivých částí opěrek, za účelem zjištění zdroje rušivých frekvencí. Na závěr byla provedena různá měření se změnou dílů produktu a zhodnocen jejich vliv na chování opěrek.

**Klíčová slova:** hlavová opěrka, měření vibrací, měření hluku, frekvenční analýza.

## Abstract

The first goal of my diploma work is vibration and noise measurement of head rest mechanism for BMW series 5, 7 and X5 cars. The head rest noise and vibration measurements were made using multianalyzer PUSLE from Brüel&Kjaer with accelerometer, microphone and current probe. The main aim of diploma thesis was spectral analysis of measured quantities at various conditions of head rest mechanism settings. Spectral analysis was focused to various parts of head rest to find the main sources of head rests noise and vibration. Finally the spectral analysis with various part changes were made for assignment their influence to overall head rest behaviour.

**Keywords:** head rest, vibration measurement, noise measurement, frequency analysis.

## Obsah

<b>Prohlášení</b>	<b>3</b>
<b>Poděkování</b>	<b>4</b>
<b>Abstrakt</b>	<b>5</b>
<b>Úvod</b>	<b>14</b>
<b>1 Technická diagnostika</b>	<b>15</b>
1.1 Cíle technické diagnostiky . . . . .	15
1.2 Senzory v diagnostických systémech . . . . .	15
1.3 Význam technické diagnostiky . . . . .	16
<b>2 Vibrodiagnostika</b>	<b>17</b>
2.1 Poruchy a jejich příčiny . . . . .	17
2.2 Základy mechanického kmitání a snímačů vibrací . . . . .	18
2.2.1 Senzory výchylky . . . . .	20
2.2.2 Senzory rychlosti . . . . .	21
2.2.3 Senzory zrychlení - akcelerometry . . . . .	21
2.3 Analýza signálu v časové oblasti . . . . .	22
2.4 Analýza signálu ve frekvenční oblasti . . . . .	23
2.5 Frekvenční analýza periodických signálů . . . . .	23
<b>3 Hluková diagnostika</b>	<b>26</b>
3.1 Akustické veličiny . . . . .	26
3.1.1 Akustický tlak . . . . .	26
3.1.2 Akustická rychlost . . . . .	27
3.1.3 Rychlost šíření zvuku . . . . .	28
3.1.4 Intenzita zvuku . . . . .	28
3.1.5 Akustický výkon . . . . .	28
3.2 Další důležité pojmy v akustice . . . . .	29
3.3 Hladiny akustických veličin . . . . .	29

3.4	Vlastnosti zvukového pole . . . . .	31
3.4.1	Volné zvukové pole . . . . .	31
3.4.2	Difúzní zvukové pole . . . . .	32
3.4.3	Smíšené pole . . . . .	32
3.5	Technická měření zvuku . . . . .	33
3.5.1	Měření hladiny akustického tlaku . . . . .	33
3.5.2	Měření intenzity zvuku . . . . .	34
3.5.3	Váhové filtry . . . . .	34
3.6	Frekvenční analýza zvuku . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Měřicí projekt</b>	<b>38</b>
4.1	Měřicí systém a použité snímače . . . . .	38
4.2	Konstrukce hlavových opěrek . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Měření a analýza</b>	<b>45</b>
5.1	Postup měření . . . . .	45
5.2	Měření s různými stupni zátěže . . . . .	46
5.2.1	Naměřené hodnoty . . . . .	46
5.2.2	Zhodnocení měření . . . . .	46
5.3	Měření s různou tvrdostí pružné spojky . . . . .	50
5.3.1	Naměřené hodnoty . . . . .	50
5.3.2	Zhodnocení měření . . . . .	54
5.4	Měření s různým množstvím tuku . . . . .	57
5.4.1	Naměřené hodnoty . . . . .	57
5.4.2	Zhodnocení měření . . . . .	58
5.5	Měření jednotlivých částí opěrky . . . . .	61
5.5.1	Naměřené hodnoty . . . . .	61
5.5.2	Zhodnocení měření . . . . .	61
5.6	Měření opěrky s různým napájecím napětím . . . . .	63
5.6.1	Naměřené hodnoty . . . . .	63
5.6.2	Zhodnocení měření . . . . .	63

<b>OBSAH</b>	<b>8</b>
<b>Závěr</b>	<b>65</b>
<b>Použitá literatura</b>	<b>66</b>
<b>Obsah DVD</b>	<b>67</b>
<b>Přílohy</b>	<b>68</b>
<b>A Grafy z měření různých částí opěrky</b>	<b>69</b>
<b>B Grafy z měření opěrek při různém napájecím napětí</b>	<b>71</b>

## Seznam tabulek

1	Referenční hodnoty akustických veličin . . . . .	30
2	Počítání s hladinami . . . . .	30
3	Hladiny různých zvuků . . . . .	31
4	Měření vibrací bez zátěže a se zátěží 4kg . . . . .	48
5	Měření vibrací a hluku - tvrdá spojka . . . . .	51
6	Měření vibrací a hluku - středně tvrdá spojka . . . . .	52
7	Měření vibrací a hluku - měkká spojka . . . . .	53
8	Měření vibrací a hluku - různé množství tuku, bez zátěže . . . . .	57
9	Měření vibrací a hluku - různé množství tuku, zátěž 4kg . . . . .	58
10	Měření vibrací a hluku - různé části opěrky . . . . .	62
11	Měření vibrací a hluku - různé napájecí napětí . . . . .	64

## Seznam obrázků

1	Absolutní x relativní snímač vibrací . . . . .	18
2	Harmonický pohyb . . . . .	19
3	Uspořádání piezoelektrických akcelerometrů . . . . .	22
4	Znázornění převodu časové oblasti do frekvenční . . . . .	23
5	Akustický tlak . . . . .	27
6	Volné pole . . . . .	32
7	Difúzní pole . . . . .	32
8	Schéma dvoumikrofonní sondy . . . . .	35
9	Průběhy váhových křivek A,B a C . . . . .	35
10	Pásmové filtry . . . . .	36
11	1/1 a 1/3 oktávové filtry . . . . .	36
12	Multianalizátor PULSE . . . . .	38
13	Umístění akcelerometru . . . . .	39
14	Vnitřní část bezodrazové komory . . . . .	39
15	Blokové schéma měření . . . . .	40
16	Nastavení snímačů a signálů . . . . .	40
17	Nastavení akcelerometru . . . . .	40
18	Nastavení mikrofону . . . . .	41
19	Nastavení proudové sondy . . . . .	41
20	Nastavení FFT analyzátoru . . . . .	42
21	Nastavení Overall analyzátoru . . . . .	42
22	Nastavení Time capture analyzátoru . . . . .	42
23	Hřídel se šnekovým kolem . . . . .	43
24	Pružná spojka . . . . .	43
25	Plastový kryt . . . . .	43
26	Konstrukce hlavové opěrky . . . . .	44
27	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - bez zátěže . . . . .	49
28	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - zátěž 4kg . . . . .	49
29	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - tvrdá spojka . . . . .	55

30	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - měkká spojka . . . . .	55
31	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - tvrdá spojka . . . . .	56
32	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - měkká spojka . . . . .	56
33	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - bez tuku, bez zatížení	59
34	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - s velkým množstvím tuku, bez zatížení . . . . .	59
35	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - bez tuku, bez zatížení	60
36	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - s velkým množstvím tuku, bez zatížení . . . . .	60
37	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - vřeteno . . . . .	69
38	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - šnek . . . . .	69
39	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - vřeteno . . . . .	70
40	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - šnek . . . . .	70
41	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - 11 V . . . . .	71
42	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - 13 V . . . . .	71
43	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - 11 V . . . . .	72
44	Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - 13 V . . . . .	72



## Seznam použitých zkratek a symbolů

$a$	– zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$a_n$	– amplituda určité frekvenční složky časového signálu $f(t)$
$A$	– amplituda harmonického signálu
$b$	– tuhost tlumiče
$b_n$	– amplituda určité frekvenční složky časového signálu $f(t)$
$B$	– šířka pásma [Hz]
$c$	– rychlost šíření zvuku v prostředí [ $m \cdot s^{-1}$ ]
CPB	– Constant Percentage Bandwidth
DFT	– diskrétní Fourierova transformace
$f = 1/T$	– frekvence periodického signálu
$f(t)$	– periodická funkce času
$F^{-1} \{X(\omega)\}$	– inverzní FT
$F, F(b)$	– budící síla [N]
$F(k)$	– koeficienty rozvoje Fourierovy řady
FFT	– rychlá Fourierova transformace
$H$	– hladina veličiny [bel]
$I$	– intenzita zvuku [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$I_n$	– vektor intenzity zvuku ve směru normály [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$j$	– imaginární jednotka
$k$	– tuhost pružiny [ $N \cdot m^{-1}$ ], celé číslo, index
$L_I$	– hladina intenzity zvuku [dB]
$L_p$	– hladina tlaku [dB]
$L_W$	– hladina výkonu [dB]
$m$	– hmotnost [kg]
$M$	– hmotnost [kg]
$n$	– celé číslo, index
$N$	– délka záznamu (počet vzorků)
$p$	– akustický tlak [Pa]

PC	– Personal Computer
RMS	– efektivní hodnota signálu
S	– plocha [ $m^2$ ]
t	– spojitý čas [s]
$T = 1/f$	– doba periody periodického signálu
v	– rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
x(t)	– signál, funkce spojitého času t
$x_{ef}$	– efektivní hodnota
x(k)	– hodnoty vzorkovaného signálu
$X(\omega)$	– FT signálu x(t)
y	– výchylka, dráha
y(t)	– signál, funkce spojitého času t
$Y(\omega)$	– FT signálu y(t)
W	– výkon [W]
$\delta(t)$	– impulsní vzorkovací funkce
$\Delta(t)$	– vzorkovací interval [s]
$\varphi$	– počáteční fáze harmonického signálu
$\lambda$	– vlnová délka [m]
$\rho$	– hustota prostředí [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\omega = 2\pi f$	– úhlová frekvence [ $rad \cdot s^{-1}$ ]
$\Omega$	– úhlová frekvence [ $rad \cdot s^{-1}$ ]
$\bar{x}$	– nad veličinou značí střední hodnotu
$\rightarrow$	– nad veličinou značí vektor
$\cdot$	– nad veličinou značí derivaci
$\ddot{\phantom{x}}$	– nad veličinou značí dvojitou derivaci

## Úvod

Technická diagnostika nachází stále větší uplatnění v mnoha oblastech techniky. Strojírenské výrobky jsou navrhovány s větší precizností a jsou na ně kladeny velké nároky z hlediska přímých vlastností, které ovlivňují jejich kvalitu a tudíž konkurenceschopnost. Proto jsou nové výrobky podrobovány analýze, která zahrnuje také měření vibrací a hluku. Analýza spekter vibrací a hluku je nástrojem moderního způsobu identifikace mechanických závad a poruch. Přesnost výroby a montáže se výrazným způsobem podílí na výsledných vibracích a hlučnosti produktu. Posouzení hlučnosti je nezbytnou součástí výrobního procesu, který vyžaduje rozhodnutí o kvalitě produktu, tj. o vypuštění výrobku na trh nebo vyřazení z montážní linky. Vysoké nároky spotřebitele nutí výrobce neustále hledat nové způsoby zdokonalování svých výrobků, ale také zároveň snižovat nežádoucí vibrace a hluk.

Elektricky poháněné hlavové opěrky patří k výrobkům, které mají poměrně jednoduchou konstrukci a přitom zvyšují komfort osobních automobilů, ve kterých jsou instalovány. Naproti tomu už může být problematická z vibračního a akustického hlediska díky vlastnímu elektrickému pohonu. Také vzhledem k použitým materiálům je nezbytná analýza kvality, zejména hlučnosti.

Právě touto analýzou se budeme zabývat. V první části se seznámíme s jednotlivými druhy technické diagnostiky tj. s vibrodiagnostikou a hlukovou diagnostikou a nahlédneme do způsobu vyhodnocování naměřených dat. V další části se podíváme na konstrukci elektricky poháněných hlavových opěrek, které jsou problematické zejména v místě převodu hnacích sil na zatíženou opěrku. Kromě tohoto se podílí na celkové hodnotě vibrací a hluku přesnost výroby a uložení ozubeného šneku. Dále provedeme měření vibrací a hluku těchto opěrek v obou směrech řízení. Pro lepší identifikaci rušivých frekvencí budeme měřit hlavové opěrky s různými stupni zátěže a následně proměříme jednotlivé problematické části opěrek, které by mohli přispět k odhalení zdroje vibrací. Na závěr provedeme další experimentální měření. Tato měření budeme provádět na moderním multianalyzátoru PULSE firmy Brüel & Kjaer, která patří ke špičce v oblasti měřicí techniky.

## 1 Technická diagnostika

Technická diagnostika je obor zkoumající metody a prostředky zjišťování stavu objektů a systémů. Ve většině případů jde o bezdemontážní a nedestruktivní postupy s cílem získat informace o zkoumaném objektu. Tyto metody vyhodnocují vnější projevy diagnostikovaných systémů (např. vibrace, hluk atd.).

### 1.1 Cíle technické diagnostiky

Hlavním cílem technické diagnostiky je využít všechny užitečné informace o stavu zkoumaného objektu bez demontáže, za jeho běžného, popř. do extrémních podmínek nastaveného provozu. Záleží na zvážení v jakém rozsahu diagnostiku a její konkrétní provedení využijeme. V úvahu musíme vzít předpokládané náklady na diagnostický systém a jeho provoz a na druhou odhad výše úspor získaných odstraněním technických závad a tím snížení počtu náhradních dílů, prodloužení životaschopnosti výrobku, zvýšení konkurence schopnosti na trhu atd.

Rozložení diagnostického systému se volí podle sledovaného objektu a podle poruchy funkce objektu avizovanou některou z fyzikálních veličin. Při podrobné diagnostice složitého systému se měří hned na několika místech a to i několik různých veličin současně. Naměřená data jsou následně číslicově zpracovávány a zobrazovány v uživatelsky názorné grafice. Při diagnostice přímo ve výrobním procesu provádí počítačová technika on-line vyhodnocování naměřených hodnot a výstražnými signály upozorňuje na nevyhovující parametry, které mohou vést až k automatickému přerušení provozu objektu.

### 1.2 Senzory v diagnostických systémech

Senzory sledující na vhodných místech měřeného objektu velikost a průběh fyzikálních veličin jsou zpravidla nejvíce sledované části diagnostického systému z hlediska přesnosti a spolehlivosti. Je tedy velmi důležité tyto senzory ve vhodných časových intervalech kalibrovat. Další části systému pro zesílení měřících signálů, číslicové zpracování, sledování a zobrazování dat nejsou díky dnešní moderní elektronice zdrojem významných chyb.

Základní otázkou u sledovaných objektů je stanovit místa, na kterých je vhodné měřit senzorem změnu fyzikální veličiny charakterizující monitorovanou poruchu, popř. její vývoj. Technická diagnostika se nemusí zabývat jen ustáleným režimem provozu objektu, ale zaměřuje se také na přechodové režimy při jejich spouštění a vypínání.

Neméně důležité je stanovit správná kritéria pro hodnocení závažnosti poruchy až do mezní situace, kdy hrozí havárie. V této práci se budeme zabývat těmito druhy technické diagnostiky objektů:

- vibrodiagnostika: v kritických bodech se měří a vyhodnocuje mechanické kmitání,
- hluková diagnostika: v kritických místech se měří hluk s aktuálním frekvenčním spektrem.

### 1.3 Význam technické diagnostiky

Stále častěji se můžeme setkávat u moderních výrobků v průmyslové výrobě s technickou diagnostikou jejich funkce. K tomuto rozšíření vedou především dva důvody - bezpečnost a náklady. Technická diagnostika podstatně zvyšuje bezpečnost provozu sledovaných objektů a nová technika – senzory, mikroelektronika a výpočetní technika – umožňuje snáze realizovat technickou diagnostiku jako součást sledovaných strojů i v podobě diagnostických center pro univerzální využití při sledování většího počtu objektů i různého druhu. Vhodnými schématy údržby založené na průběžné diagnostice lze předcházet poruchám objektů a optimalizovat náklady na jejich životní cyklus.

## 2 Vibrodiagnostika

Žádný stroj nelze vyrobit, aby za provozu nebyl doprovázen vibracemi. Tyto mechanické kmity jsou pro každý stroj charakteristickou veličinou a odráží jeho vnitřní vazby a stavy. Protože vibrační diagnostika je už v této době velice propracovaná metoda zjišťování stavu strojů, jsou vibrace vhodnými diagnostickými signály pro komplexní informace o technických stavech objektů. Mimo informací o vnitřních stavech jednotlivých uzlů a dílů mohou vibrace podat údaje o místě a příčině poruchy s vysokou přesností.

### 2.1 Poruchy a jejich příčiny

U každého stroje se dříve či později vyskytnou závady či poruchy, které ovlivňují jeho funkční spolehlivost. Každá závada a porucha má svou příčinu a jejich znalost nám umožňuje navrhnout vhodný diagnostický systém.

Poruchy mohou vznikat díky vnitřním nebo vnějším příčinám. Za vnější příčiny považujeme nedodržení provozních podmínek a předpisů pro zatěžování, obsluhu a údržbu. Vnitřní příčiny jsou v nedostacích výrobku. Závady a poruchy můžeme dělit podle následujících hledisek :

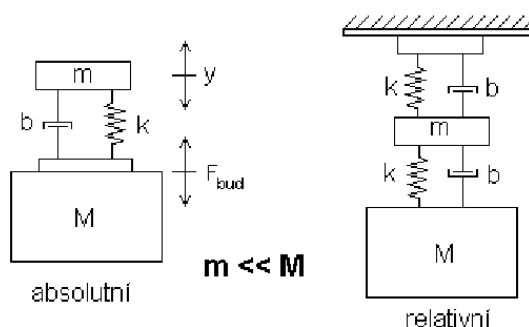
- druh poruchy (opotřebení, zadření, únava, přetížení apod.)
- čas vzniku (při montáži, za provozu apod.)
- časová charakteristika (náhlá, postupná, občasná apod.)
- místo vzniku (vada materiálu, technologie, konstrukce, provoz apod.)
- stupeň rozsahu (částečný, úplný)
- následky

Příčiny poruch mohou být způsobeny chybou v projekční přípravě, konstrukci (nevhodná volba materiálu, neodhadnutí působících sil, únava materiálu apod.), výrobě (nedodržení rozměrových tolerancí, nedůsledná kontrola, špatná montáž), obsluze, údržbě (přetěžování, nedostatečná nebo žádná údržba) nebo nesprávném zacházení s objektem. Nejčastější příčinou provozních poruch je mechanický lom, nadměrné opotřebení, deformace, změna mechanických vlastností materiálů, náhlé zatížení apod.

## 2.2 Základy mechanického kmitání a snímačů vibrací

Kmitání je spojeno s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem ložisek, hřídelí převodovek, vřeteli v kluzných ložiscích atd. Kmitání dělíme na periodické, neperiodické a náhodné. Pokud periodické kmitání obsahuje jedinou frekvenci, nazýváme ho harmonické. Další rozlišení u strojů a zařízení je na absolutní a relativní kmitání. U absolutního kmitání tělesa je jeho pohyb vztahován k pevnému bodu, relativní je vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu. Podle tohoto můžeme rozlišit senzory kmitání na

- senzory absolutní
- senzory relativní



Obrázek 1: Absolutní x relativní snímač vibrací

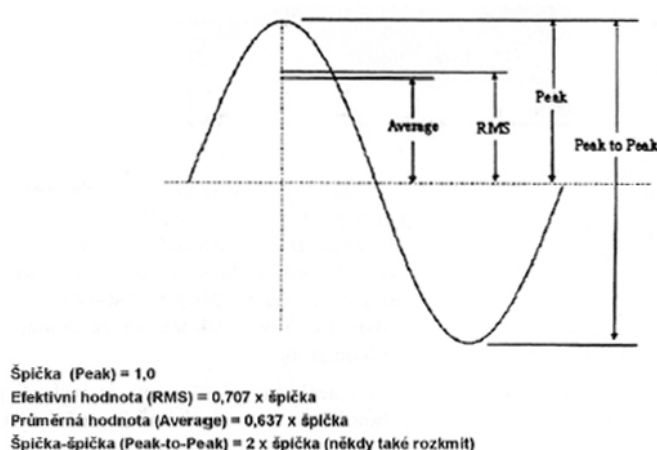
Diferenciální rovnice, kterou lze popsat zjednodušeně kmitání seismické hmoty snímače vypadá následovně:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = Ma = F_b \quad (1)$$

Ve spojitosti s kmitáním různých mechanických systémů se používají snímače výchylky kmitů, rychlosti kmitů a nejčastěji pak zrychlení kmitů – akcelerometr. Snímač zrychlení použijeme i pro naše měření, použitý akcelerometr bude popsán v další části práce. Všechny tyto snímače převádí mechanickou veličinu na elektrický signál, který je elektronicky zpracováván.

Celkové vibrace představují celkovou vibrační energii měřenou v jistém frekvenčním rozsahu. Měřením celkových vibrací stroje nebo jeho částí a porovnáním této hodnoty s její normální úrovní se získají informace o stavu stroje.

Při měření celkových vibrací se používají tato vyjádření: špičková hodnota (peak), špička - špička (peak to peak), průměrná hodnota (average) a efektivní hodnota (RMS).



Obrázek 2: Harmonický pohyb

*Peak* udává vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní. Hodnota *peak to peak* udává největší rozkmit hodnoceného signálu, její použití je vhodné v případech, kdy pro hodnocení chvění je významná výchylka chvění. *Average* je průměrnou hodnotou amplitudy průběhu vlny. U ideálního sinusového průběhu se průměrná hodnota rovná nule (průběh v kladném i v záporném stavu je shodný). Většina průběhu vln však nemá ideální sinusovou charakteristiku. *RMS* je odvozena matematickou cestou, porovnávání energií nebo výkonu stejnosměrného a střídavého proudu. Ideální sinusové křivky je efektivní hodnota rovna 0,707 ze špičkové hodnoty.

Je-li základní harmonický pohyb popsateľný rovnicí

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

pak střední hodnota signálu je

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3)$$



a efektivní hodnota tohoto signálu je

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = RMS \quad (4)$$

Dá se říci, že měření vibrací je vlastně měření periodického pohybu. U tohoto měření jsou důležité tři měřitelné charakteristiky – výchylka, rychlost a zrychlení. Pro získání správně poruchové charakteristiky je nutné k měření použít vhodný způsob měření a typ snímače.

**Výchylka** udává rozdíl vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. V této době jsou ve vibrační diagnostice nejrozšířenější indukčnostní snímače využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Snímač výchylky je tedy bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy.

**Rychlost** udává změnu výchylky vibračního signálu za určitý časový okamžik, měří se tedy v  $m \cdot s^{-1}$ . Velmi často se pro měření rychlosti používají relativně levné akcelerometry, ze kterých se hodnota rychlosti získává integrováním hodnot zrychlení.

Nejčastěji se pro měření využívá měření **zrychlení**. K tomu se využívají senzory zvané akcelerometry, které obvykle obsahují jeden nebo více piezoelektrických krystalů a hmotné těleso. Deformováním tohoto piezoelektrického krystalu vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Krystal je deformován hmotným tělesem, které kmitá spolu s měřeným objektem, ke kterému je akcelerometr připevněn.

### 2.2.1 Senzory výchylky

Senzory výchylky a polohy jsou realizovány na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém aj. principu. Ve vibrační diagnostice se z nich nejvíce využívají indukčnostní senzory. Tyto senzory jsou velmi náchylné na parazitní vlivy (např. délku kabelu k měřicímu objektu, vnější elektromagnetické pole) vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu. Z těchto důvodů se vyrábějí integrované do kovového stíněného krytu, kde je kromě cívky zabudována základní elektronika. Tyto senzory obvykle měří v kmitočtovém rozsahu 0 - 10 000 Hz.

Pro většinu snímačů kmitů je charakteristická vysoká hmotnost, naproti tomu nízká tuhost a tlumení. V praxi jsou poměrně rozšířené, ale nutno podotknout, že do této skupiny snímačů patří i všechny ostatní snímače posunutí.

### 2.2.2 Senzory rychlosti

Pro měření rychlosti kmitání se velmi často používají senzory zrychlení a výstupní signál z tohoto senzoru se integruje. Další možností je měření pomocí elektrodynamického senzoru. Pro snímače rychlosti kmitů je charakteristické vysoké tlumení oproti nízké hmotnosti a tuhosti. Výhody elektrodynamických senzorů rychlosti jsou následující:

- nízká cena
- dostatečná úroveň výstupního signálu i při nízkých frekvencích vibrací
- velmi malý vnitřní odpor
- nepotřebuje vnější zdroj napájení.

Nevýhody:

- omezení horní frekvence (max. 3 500 Hz)
- citlivost na parazitní magnetické pole.

### 2.2.3 Senzory zrychlení - akcelerometry

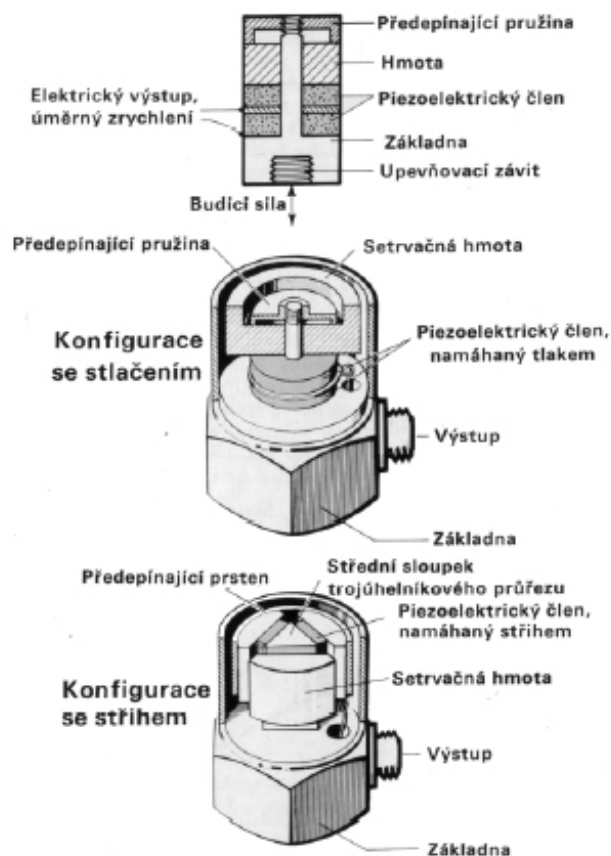
Nejvyužívanější akcelerometry obsahují piezoelektrické krystaly, kromě těchto senzorů lze použít pro měření zrychlení kmitání integrované tenzometrické nebo kapacitní akcelerometry nebo elektrodynamické senzory rychlosti doplněné derivačním obvodem.

Přesto se v praxi převážně používá právě piezoelektrických akcelerometrů, které mají řadu výhod:

- velký dynamický rozsah frekvencí od 5 000 do 10 000 Hz, se speciálním elektronickým vybavením lze měřit od 0,01 do 20 000 Hz
- malé rozměry a hmotnost akcelerometrů
- necitlivost na rušivé magnetické pole.

Nevýhody:

- vyšší pořizovací cena
- nízká úroveň výstupního signálů, je tedy potřeba zesilovač a tedy napájecí zdroj.

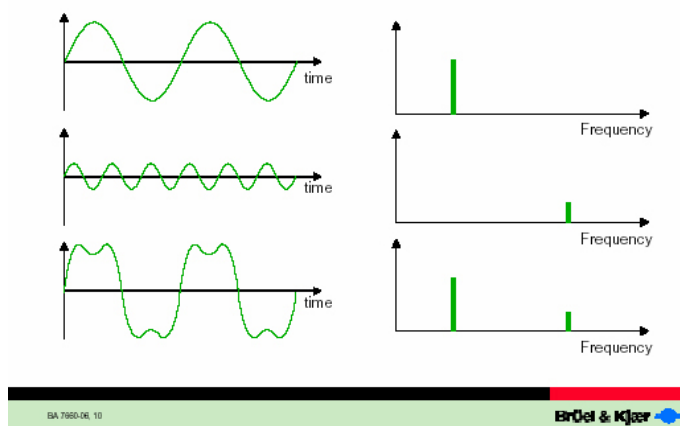


Obrázek 3: Uspořádání piezoelektrických akcelerometrů

### 2.3 Analýza signálu v časové oblasti

Analýzu signálu v časové oblasti můžeme rozdělit na vyhodnocení celkového kmitání a časových průběhů signálů. Celkové kmitání souvisí s celým frekvenčním rozsahem vibrací v daném měřicím bodě. Porovnává se naměřená hodnota celkových vibrací s předchozím měřením, během kterého sledovaný objekt pracoval bez poruchy. Další

srovnání je s naměřenými daty z měření s nastavenými kritickými hodnotami. Toto diagnostikování stroje je díky celkovým hodnotám kmitání standardní metoda, jejíž výhodou je rychlost vyhodnocení a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je, že signály s malou amplitudou se ztrácejí ve vibračním šumu a také tato metoda nám neposkytuje informace o příčině kmitání stroje.



Obrázek 4: Znáznornění převodu časové oblasti do frekvenční

## 2.4 Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Správnou aplikací spektrální analýzy odstraníme nedostatky analýzy v časové oblasti. Je to metoda, která poměrně účinně pomáhá lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí objektu. Úplná frekvenční analýza je reprezentována frekvenčním a fázovým spektrem. Fázové spektrum nutné pro rozpoznání typu nevyváženosti a s tím související pro metody vyvažování. Frekvenční spektrum tvoří podklad nalezení závad na rotujícím stroji (např. nevyváženosti, ozubená soukolí, ložiska apod.).

## 2.5 Frekvenční analýza periodických signálů

Většina současných měřících přístrojů používá ke frekvenční analýze matematického postupu, díky němu ze změřeného časového komplexního signálu vypočítají jednotlivé frekvenční složky využitím FFT (Fast Fourier Transform – rychlá Fourierova transformace).

Každou periodickou funkci  $f(t)$  s periodou  $T$  můžeme vyjádřit nekonečnou sumou řady funkcí sinus a kosinus. Frekvence každé z těchto funkcí je dána celočíselným násobkem frekvence výchozí funkce. Jde o Fourierovy řady, které vyjádříme ve tvaru

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n2\pi \frac{t}{T}) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n2\pi \frac{t}{T}) \quad (5)$$

kde koeficienty jsou dány vztahy

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n2\pi \frac{t}{T}) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n2\pi \frac{t}{T}) dt \quad (8)$$

Koeficienty  $a_n$  a  $b_n$  udávají amplitudy jednotlivých frekvenčních složek časového signálu  $f(t)$ .

Tuto Fourierovu řadu však můžeme použít pouze pro periodické signály. Reálné signály jsou však při frekvenční analýze vibrací a hluku většinou neperiodické. V tom případě roste  $T \rightarrow \infty$  a frekvence kmitočtových složek nejsou celočíselné násobky základní frekvence, ale mohou nabývat spojitého spektra hodnot. Pro výpočet kmitočtových složek je pak nutné použít Fourierovu transformaci pro obecný signál podle následujících vztahů přímé a zpětné transformace:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (9)$$

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (10)$$

Funkce  $F_k$  je obecně komplexní (má reálnou i imaginární složku) a obsahuje informace o amplitudách a fázích všech harmonických frekvencí, které jsou zaznamenány v  $x(t)$ .

Fourierova transformace je dána spojitým analytickým integrálem. Akustický a vibrační signál v časové oblasti je však senzory zaznamenán v diskrétních časových okamžicích vzdálených o  $\Delta t$  (interval vzorkování). Nejdříve tedy vytvoříme signál  $y(t)$

$$y(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x_k \delta(t - k \Delta t) = x(t) \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - k \Delta t), \quad (11)$$

pro který lze vypočítat Fourierovu transformaci podle vztahů (9,10).

Funkce  $y(t)$  je součin funkce  $x(t)$  a postupně posouvané impulsní vzorkovací funkce  $\delta(t)$ , jejich Fourierova transformace je tedy dána konvolucí jednotlivých obrazů

$$F\{y(t)\} = \frac{1}{2\pi} F\{x(t)\} * F\left\{\sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - k \Delta t)\right\}. \quad (12)$$

Pro označení  $X(\omega) = F\{x(t)\}$ ,  $Y(\omega) = F\{y(t)\}$  lze provést následující úpravy

$$Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega - \Omega) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \exp(-j\Omega k \Delta t) d\Omega = \dots \quad (13)$$

$$\dots = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega - \Omega) \frac{2\pi}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(\Omega - k \frac{2\pi}{\Delta t}) d\Omega \quad (14)$$

Fourierova transformace vzorkovaného signálu je následně dána vztahem

$$Y(\omega) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(\omega - k \frac{2\pi}{\Delta t}) \quad (15)$$

Pokud budeme předpokládat vzorkování a periodicitu signálu, významně změňme obecnou Fourierovu transformaci na diskretní Fourierovu transformaci (DFT).

$$F_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \exp(-j \frac{2\pi}{N} k i), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \exp(j \frac{2\pi}{N} k i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (17)$$

První vztah, tzv. přímá diskretní Fourierova transformace, lze použít pro výpočet koeficientů  $F_k$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , které jsou obecně komplexní čísla. Tyto koeficienty jsou pro každou frekvenci  $N$ -násobkem poloviční velikosti vektorů, které proti sobě rotují s opačnou úhlovou rychlostí. Lze vypočítat všechny koeficienty pro úplný obraz frekvenčního složení signálu, nebo jen některé z nich, v případě zájmu jen o některé frekvenční složky signálu. Druhý vztah, inverzní diskretní Fourierova transformace, má uplatnění v syntéze vzorkovaných hodnot signálu pro koeficienty  $F_k$ .

Efektivní algoritmus pro výpočet těchto vztahů se nazývá rychlá Fourierova transformace (FFT). Dnes je k dispozici ve většině moderních programech pro PC používaných k technickým výpočtům. Při použití algoritmu FFT jsme omezeni na hodnoty  $N = 2^m$ . Tato podmínka neplatí obecně pro diskretní Fourierovu transformaci, ale je to omezení díky kterému výpočet probíhá mimořádně efektivně, což je ve většině případů frekvenční analýzy podstatné.

### 3 Hluková diagnostika

Zvuk se stal naprosto běžnou součástí našeho života, že si jen sotva uvědomujeme všechny jeho funkce a účinky. Zvuk v člověku může vzbuzovat příjemné pocity (poslech hudby, ptačí zpěv atd.), stal se běžným prostředkem dorozumívání mezi lidmi atd. Pro nás je ale důležité z technického hlediska, že může být pomocným ukazatelem při diagnostice objektů.

Ve vyspělé společnosti je však zvuk (20 Hz – 20 kHz) často rušivým až nebezpečným faktorem. Řada zvuků se dá označit jako nežádoucí – tedy jako hluk. Míra nepříjemnosti je určena jeho fyzikálními vlastnostmi, ale také subjektivním vnímáním dobrovolných či nedobrovolných posluchačů. Dokonce i relativně slabý zvuk, může být rušivý a nepříjemný. Nejhorší vlastností hluku je však jeho potenciální nebezpečnost, spočívající v možnosti způsobení přechodných či trvalých škod.

#### 3.1 Akustické veličiny

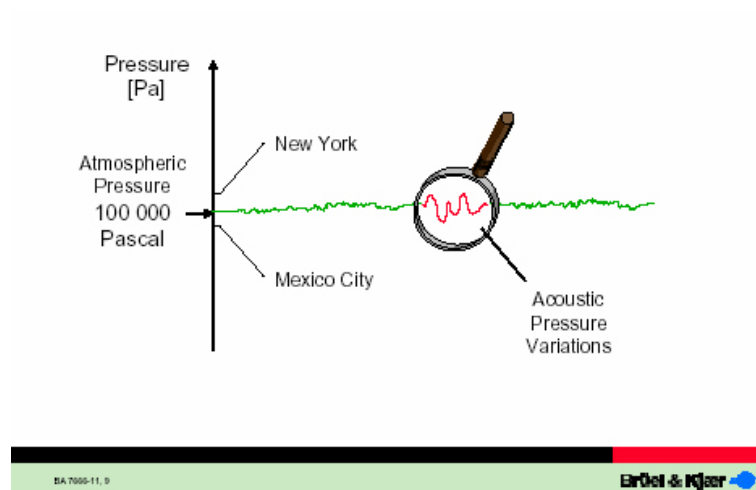
V následujících kapitolách se seznámíme se základními veličinami používanými v akustice.

##### 3.1.1 Akustický tlak

Akustický tlak  $p$  [Pa] je střídavý tlak při šíření zvuku a udává tak odchylky od klidové hodnoty atmosférického tlaku jak vidíme na obrázku 5.

Akustický tlak

- je skalár,
- má charakter vlnění,
- je velmi důležitou veličinou v akustice, protože přístroje na snímání akustického tlaku jsou nejrozšířenější a principiálně jednodušší než na snímání jiných akustických veličin.



Obrázek 5: Akustický tlak

### 3.1.2 Akustická rychlost

Akustická rychlost  $\vec{v}$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je rychlost, kterou se částice pohybují v prostředí působením akustického tlaku kolem rovnovážné polohy. Akustická rychlost

- je vektor,
- je fyzikálně rovnocenná akustickému tlaku,
- má charakter vlnění,
- i přesto že je to měřitelná veličina, díky složitosti tohoto měření se nepoužívá.

Ve volné akustickém poli je poměr mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí konstantní.

$$\frac{p}{v} = \rho \cdot c = konst. \quad (18)$$

kde značí

$\rho$  - hustotu prostředí [ $kg \cdot m^{-3}$ ],

$c$  - rychlost šíření zvuku v prostředí [ $m \cdot s^{-1}$ ].



### 3.1.3 Rychlost šíření zvuku

Rychlost šíření zvuku  $c [m \cdot s^{-1}]$  nám říká za jak dlouhou dobu překoná v daném prostředí zvuková vlna vzdálenost 1 m ve směru svého šíření. V pevných látkách vzniká podélné, torzní a ohybové vlnění, v plynech vzhledem k fyzikální podstatě vzniká pouze podélné vlnění, pro které je typické, že částice prostředí kmitají ve směru šíření zvukové vlny.

Pro rychlost zvuku platí vztah

$$c = \lambda \cdot f \quad (19)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka  $[m]$  a  $f$  je frekvence šířeného zvuku  $[Hz]$ .

Rychlost zvuku

- je vektor
- nemá charakter vlnění.

### 3.1.4 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku  $\vec{I} [W \cdot m^{-2}]$  je měřítkem akustické energie procházející jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření zvukové vlny. Intenzitu zvuku nám udává vztah

$$\vec{I} = \frac{W}{S} = \frac{\vec{F} \times \vec{v}}{S} = \frac{F}{S} \cdot \vec{v} = p \cdot \vec{v} \quad (20)$$

Intenzita zvuku

- je vektor,
- má charakter vlnění.

Intenzita zvuku má velký význam při diagnostice zdroje hluku a stanovení akustického výkonu.

### 3.1.5 Akustický výkon

Akustický výkon  $W [W]$  je měřítkem celkové akustické energie procházející plochou. Jeho výpočet je dán

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot d\vec{S}, \quad (21)$$

kde značí

$\vec{dS}$  - vektor ve směru normály na plochu  $S$ ,  
 $S$  - plochu, na které určujeme akustický výkon.

### 3.2 Další důležité pojmy v akustice

**Práh slyšitelnosti** je minimální efektivní hodnota akustického tlaku, kterou je lidské ucho schopno zachytit. Pro frekvenci  $1 \text{ kHz}$  je tato hodnota  $20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$ .

**Práh bolestivosti** je efektivní hodnota akustického tlaku, která způsobí trvalé poškození sluchového orgánu. Pro frekvenci  $1 \text{ kHz}$  je tato hodnota přibližně  $2 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ .

### 3.3 Hladiny akustických veličin

Rozsah velikosti akustického tlaku, který je lidský sluch schopen zaznamenat je určen prahem slyšitelnosti a prahem bolestivosti, které jsme definovali v předcházející kapitole. Tyto hranice nejsou konstantní, jejich průběh závisí především na frekvenci zvukové vlny. Vzhledem velkým rozsahům hodnot těchto veličin, byly zavedeny logaritmické veličiny, které v akustice nazýváme **hladiny**.

Obecná definice hladiny vypadá takto

$$H = \log \frac{P}{P_0} \quad (22)$$

kde značí

$H$  - hladinu veličiny [bel],  
 $P$  - výkon měřené hodnoty,  
 $P_0$  - referenční hodnotu výkonu.

Vzhledem k malému rozsahu se pro hladinu používá hodnota 10krát menší – **decibel** [dB]

Hladina intenzity zvuku je dána vztahem

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{db}], \quad (23)$$

hladina akustického výkonu je definována takto

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{db}], \quad (24)$$

a hladina akustického tlaku je

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad [db]. \quad (25)$$

Veličina	Označení	Hodnota
Intenzita zvuku	$I_0$	$1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
Akustický výkon	$W_0$	$1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
Akustický tlak	$p_0$	$20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$

Tabulka 1: Referenční hodnoty akustických veličin

Zajímavostí logaritmických výpočtů je skutečnost, že každé zdvojnásobení např. akustického tlaku se projeví jako přírůstek o 6 dB (u výkonu a intenzity je to o 3 dB). U trojnásobku tlaku nastane přírůstek hladiny 10 dB, u desetinásobku tlaku bude přírůstek 20 dB (u výkonu a intenzity to bude opět polovina).

Násobek veličiny	Změna hladiny tlaku [dB]	Změna hladiny výkonu a intenzity [dB]
10	20	10
5	14	7
3	10	5
2	6	3
1	0	0
1/2	-6	-3
1/3	-10	-5
1/10	-20	-10

Tabulka 2: Počítání s hladinami

V další tabulce vidíme stručný přehled hladin akustického tlaku pro vybrané příčiny zvuku.

Příklad zvuku	Hladina akustického tlaku [db]
Tichý byt	25
Byt	40
Kancelář	55
Hlučná dílna	80
Motorová vozidla	90
Pneumatické kladivo	100
Startující letadlo	115

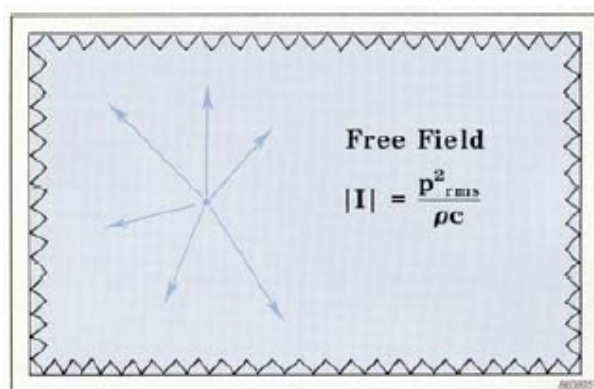
Tabulka 3: Hladiny různých zvuků

### 3.4 Vlastnosti zvukového pole

Pod pojmem zvukové pole rozumíme prostor, kde se šíří zvukové vlny. Dokonalý popis reálného akustického pole, podle základních znalostí šíření, ohybu a odrazu vlnění, s mnoha zdroji, odrazivými a poltivými plochami a překážkami je velmi složitý. V akustice pro účely měření a analýzy naměřených dat využíváme do jisté míry zjednodušení, které popisuje zvukové pole jako kombinaci dvou extrémních poloh - **volné pole** a **difúzní pole**.

#### 3.4.1 Volné zvukové pole

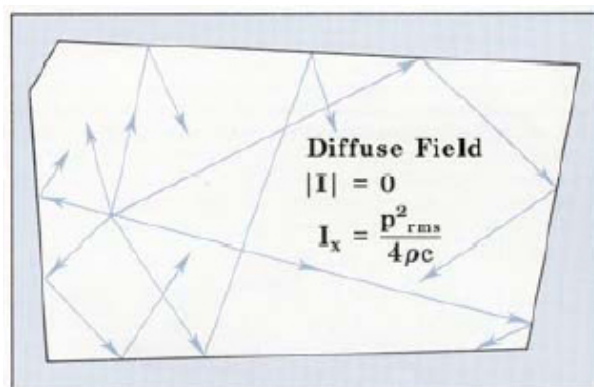
Toto pole popisuje šíření zvukových vln v ideálním volném prostoru, ve kterém nedochází k žádným odrazům. Tyto podmínky splňuje venkovní otevřený prostor (dostatečně vzdálený od země) nebo bezodrazová komora, kde všechny šířící se vlny jsou pohlceny jejími stěnami. Šíření akustických vln ve volném poli je charakteristické poklesem hladiny akustického tlaku o 6 dB (ve směru šíření zvuku) při každém zdvojnásobení vzdálenosti od zdroje zvuku.



Obrázek 6: Volné pole

### 3.4.2 Difúzní zvukové pole

V difúzním poli jsou zvukové vlny tolikrát odraženy, že se šíří ve všech směrech se stejnou magnitudou a pravděpodobností. Toto pole se nachází v uzavřené místnosti. Ačkoliv je velikost celkové akustické intenzity nulová, existuje zde závislost mezi akustickým tlakem a intenzitou v jednom směru,  $I_x$ .



Obrázek 7: Difúzní pole

### 3.4.3 Smíšené pole

Volné a difúzní pole jsou krajní polohy reálných zvukových polí, se kterými se běžně nesetkáme. Skutečný prostor bychom si měli představit jako kombinaci těchto dvou polí, přičemž v různých místech se může podobat více jednomu či druhému poli.

V **blízkém poli** vždy neplatí, že směr vektoru akustické rychlosti se shoduje se směrem šíření zvuku. Tato část pole je charakteristická poměrně výraznou změnou akustického tlaku se změnou polohy a mezi akustickým tlakem a intenzitou nenalezneme jednoduchý vztah. V **poli přímých vln** převažují vlny ve směru od zdroje, v **poli odražených vln** se kombinují odražené vlny s vlnami přímými.

### 3.5 Technická měření zvuku

Za technická měření zvuku můžeme považovat měření, která popisují akustické vlastnosti zdroje. Měřením získáváme objektivní informace o akustickém výkonu, rozložení akustické energie v blízkosti zdroje, hladinách akustického tlaku a také o technickém stavu zdroje a jeho nastavení. Bez ohledu jakým způsobem se zvuk šíří nám dává informace o příčinách hluku. Většina technických měření zvuku se řídí normami a předpisy.

#### 3.5.1 Měření hladiny akustického tlaku

Akustický tlak nepatří mezi nejvýhodnější veličiny z hlediska měření, ale ze základních veličin je jediný měřitelný. V praxi se používá jeho hodnota určená na základě efektivní hodnoty.

Měření akustického tlaku má však řadu výhod:

- jednoduché měření,
- konstrukčně jednoduchý snímač,
- akustický tlak je základ pro měření intenzity zvuku,
- přístroje pro tato měření jsou poměrně rozšířené,
- dostupnost informací.

K nevýhodám patří:

- akustický tlak je skalár,
- nedává informace o energii zdroje,
- udává stav pouze v bodě měření.

Z měření akustického tlaku můžeme poměrně jednoduše stanovit výslednou hodnotu akustického výkonu  $L_W$  ze vzorce

$$L_W = \bar{L}_p + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right), \quad (26)$$

kde značí

$S$  - plochu měřeného povrchu [ $m^2$ ],

$S_0 = 1$  [ $m^2$ ].

$\bar{L}_p$  je průměrná střední hodnota  $n$  zdrojů  $L_1, L_2, \dots, L_n$

$$\bar{L}_p = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0.1 \cdot L_i}\right). \quad (27)$$

### 3.5.2 Měření intenzity zvuku

Další princip měření akustického výkonu je založen na měření intenzity zvuku uzavřenou plochou, uvnitř které je umístěn měření zdroj zvuku. To nám popisuje rovnice

$$W = \oint_{(S)} I_n dS, \quad (28)$$

kde značí

$I_n$  - normálovou složku akustické intenzity měřená sondou,

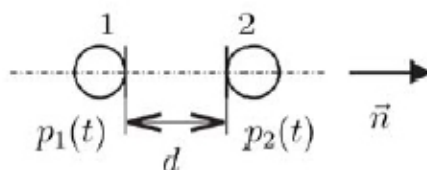
$S$  - je uzavřená plocha.

V této době jsou nejrozšířenější intenzitní sondy založené na měření akustického tlaku ve dvou blízkých bodech, jak vidíme na obrázku 8. Pro měření intenzity pomocí p-p sondy se používají velmi kvalitní kondenzátorové mikrofony. Nejčastěji jsou uspořádány čely k sobě, kdy dochází ke zlepšení fázové charakteristiky.

### 3.5.3 Váhové filtry

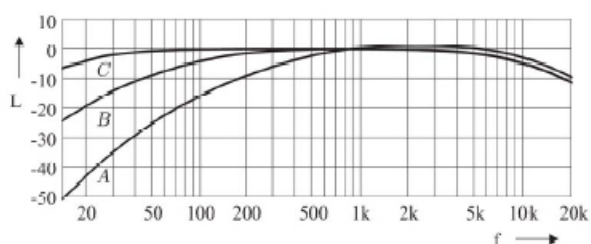
Váhové filtry řeší vztah mezi lineární frekvenční charakteristikou mikrofonu (ve slyšitelném pásmu) a frekvenční charakteristikou lidského ucha. Z toho je zřejmé, že váhové filtry se používají v případech, kdy zkoumáme působení hluku na člověka.

Charakteristiky jednotlivých filtrů jsou standardizovány a označují se velkými písmeny A, B, C a D. V současné době se téměř vždy používá filtr A, protože



Obrázek 8: Schéma dvoumikrofonní sondy

- výsledky měření s filtry B a C neodpovídají výsledkům subjektivních zkoušek tak jako filtr A,
- volba filtrů vychází ze subjektivního hodnocení a mohl by tedy nastat případ, kdy pro stejný zdroj zvuku by byly k dispozici výsledky při použití různých filtrů.



Obrázek 9: Průběhy váhových křivek A,B a C

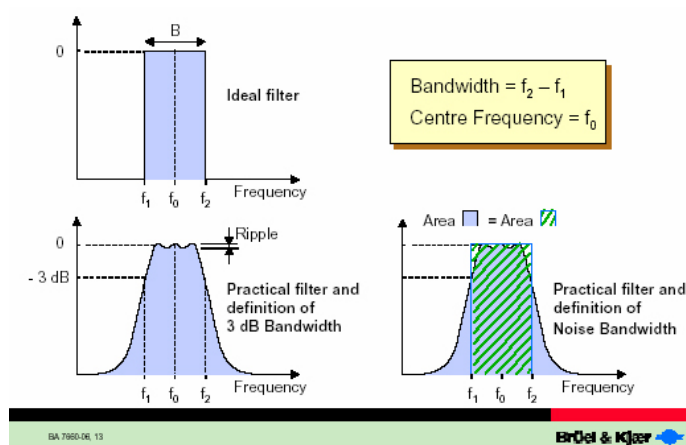
### 3.6 Frekvenční analýza zvuku

Hlavní cíl frekvenční analýzy spočívá v rozdělení zvukového signálu na řadu diskrétních frekvencí, s různou amplitudou. Počet frekvenčních pásem, na které je zvuk rozdělen, je definován uživatelem.

K analýze používáme frekvenční filtry. Vysoké přesnosti analýzy dosáhneme pokud tyto filtry mají malou šířku pásma. S ideálním filtrem se v technické praxi nesetkáme, rozdíl mezi reálným a ideálním filtrem vidíme na obrázku 10. Šířka pásma filtru je definována jako rozdíl frekvencí mezi místy, kde hodnota poklesne o 3 dB.

Nyní si popíšeme dva nejpoužívanější filtry. První z nich využívají **FFT**. Šířku pásma mají 400 Hz a používají lineární zobrazení. Tato metoda se hlavně uplatňuje ve

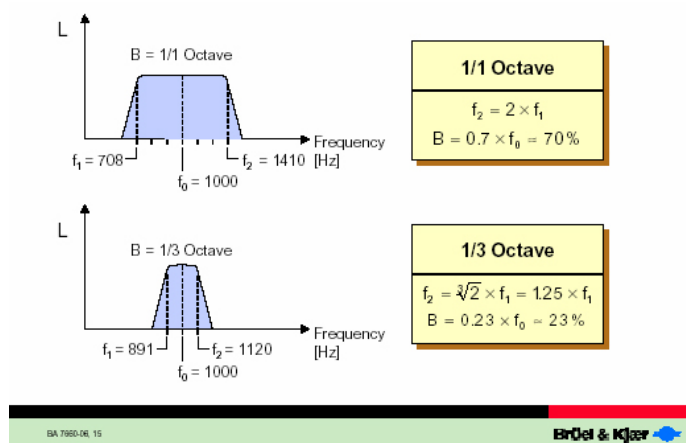




Obrázek 10: Pásmové filtry

vibrační diagnostice. Filtry, které mají procentuálně konstantní šíři pásma (**CPB filtry**), se zobrazují v logaritmických souřadnicích. Někdy se těmto filtrům také říká relativní širokopásmové filtry. Analýza, která využívá těchto CPB filtrů, se používá právě v akustice, protože její výsledky jsou podobné subjektivnímu hodnocení.

Nejpoužívanější CPB filtry jsou oktávové a třetinoctávové. Jejich charakteristiky vidíme na obrázku 11. Velmi používaný je právě třetinoctávový, který je nejvíce podobný lidskému sluchu.



Obrázek 11: 1/1 a 1/3 oktávové filtry

Nejčastěji se ve frekvenční analýze používá následujících parametrů a metod

- peak - maximální naměřená hodnota akustického tlaku,
- okamžité výchylky akustického tlaku,
- průběh spektrální výkonové hustoty.

## 4 Měřicí projekt

Cílem analýzy je diagnostika chování výškově nastavitelných hlavových opěrek pro automobil. Z tohoto důvodu se budeme zabývat charakteristikami vibrací a hluku v časové a hlavně ve spektrální oblasti. Na základě těchto požadavků stanovíme měřicí podmínky a vytvoříme měřicí projekt na multianalyzátoru PULSE.

### 4.1 Měřicí systém a použité snímače

Pro měření vibrací a hluku použijeme multianalyzátor PULSE, který díky své flexibilitě, snadné přenositelnosti a real-time měření patří k velmi oblíbeným moderním diagnostickým systémům.



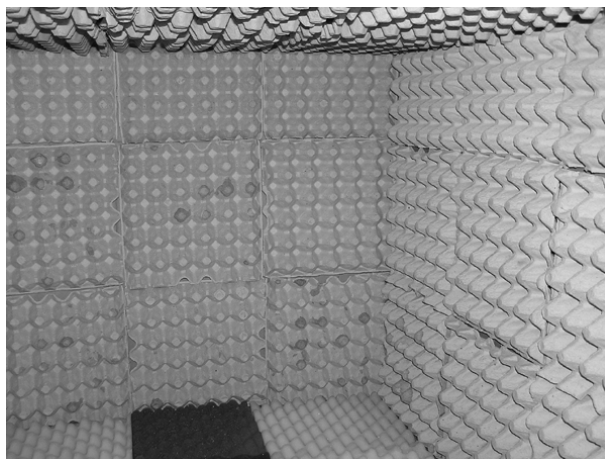
Obrázek 12: Multianalyzátor PULSE

Jako snímač vibrací použijeme akcelerometr 4508B, výrobce Brüel & Kjaer s citlivostí  $10.08 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ . Snímač umístíme na kryt opěrky v těsné blízkosti převodovky jak vidíme na obrázku 13, kde očekáváme největší míru vibrací.

Na měření hluku budeme používat mikrofon 4189C, také firmy Brüel & Kjaer. Pro věrohodné hodnoty zvuku byla sestavena akustická komora o rozměrech 90x90x80 cm, která částečně pohlcuje akustické vlny. Vnitřní část bezodrazové komory vidíme na obrázku 14. Snímač hluku byl umístěn nad středem měřené opěrky ve vzdálenosti 30 cm.



Obrázek 13: Umístění akcelerometru

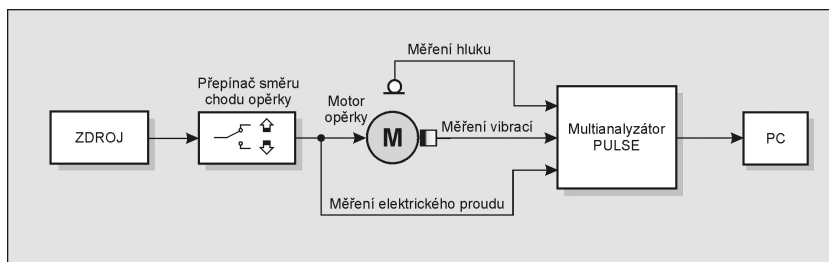


Obrázek 14: Vnitřní část bezodrazové komory

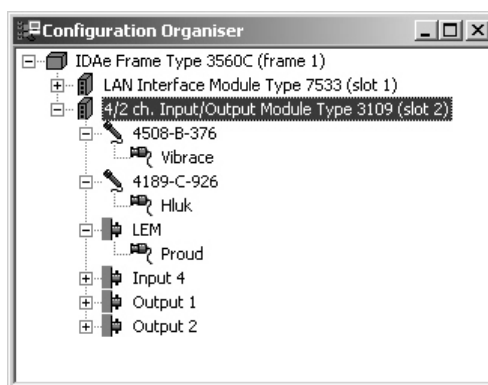
Pro měření napájecích proudů, které využijeme k výpočtu otáček motorku, použijeme proudovou sondu LEM PR200.

Na obrázku 15 vidíme schéma zapojení snímačů do PULSU. Ten následně posílá data do PC, kde s nimi můžeme nadále pracovat.

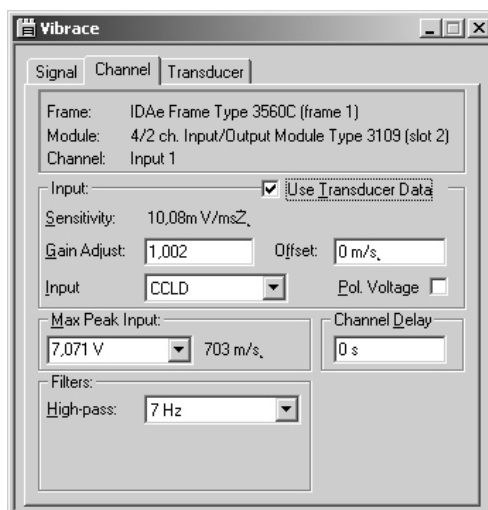
Na dalších obrázcích si ukážeme nastavení snímačů a signálů. Uvedené snímače vibrační a hluku byly před měřením zkalibrovány.



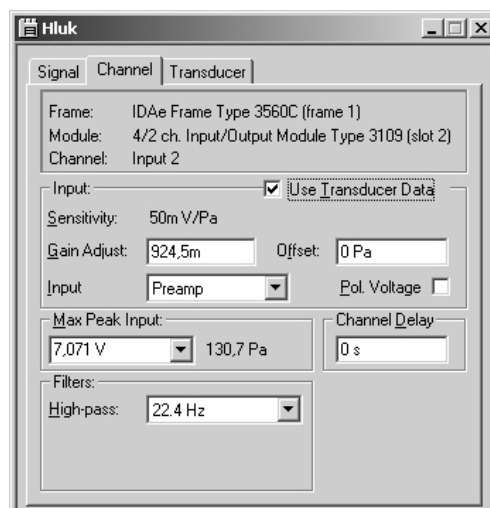
Obrázek 15: Blokové schéma měření



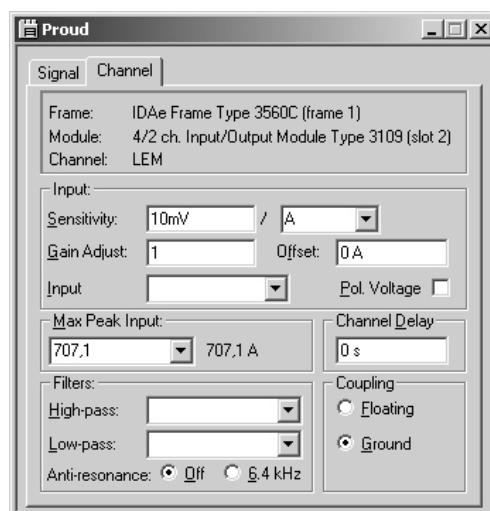
Obrázek 16: Nastavení snímačů a signálů



Obrázek 17: Nastavení akcelerometru



Obrázek 18: Nastavení mikrofonu



Obrázek 19: Nastavení proudové sondy

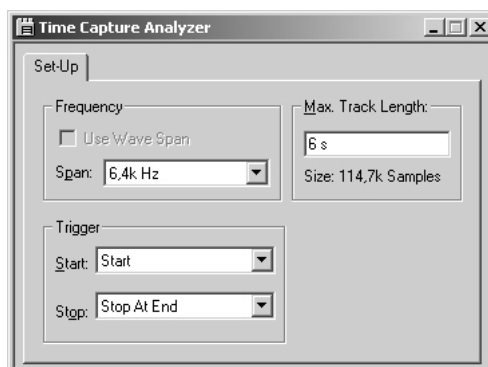
Nyní si ještě představíme nastavení analyzátorů pro diagnostiku.



Obrázek 20: Nastavení FFT analyzátoru



Obrázek 21: Nastavení Overall analyzátoru



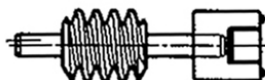
Obrázek 22: Nastavení Time capture analyzátoru

## 4.2 Konstrukce hlavových opěrek

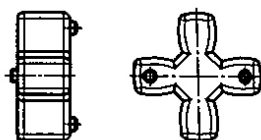
Výškově nastavitelná hlavová opěrka se skládá z motorku, hřídele pro převod hnací síly, ozubeného šneku a vřetena s vlastní opěrkou. To vše je uloženo v plastovém krytu.

Motorek je standardně napájen 12 V z rozvodu elektrické energie automobilu a zajišťuje chod opěrky. Hnací síla se přenáší přes hřídel s ozubeným šnekem, která je

uchycena v plastové vidlici. Pro tlumení vibrací spojuje tuto hřídel a motorek pružná spojka. Hřídel a spojku vidíme na následujících obrázcích.

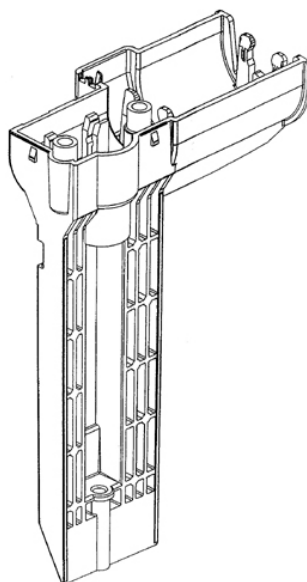


Obrázek 23: Hřídel se šnekovým kolem



Obrázek 24: Pružná spojka

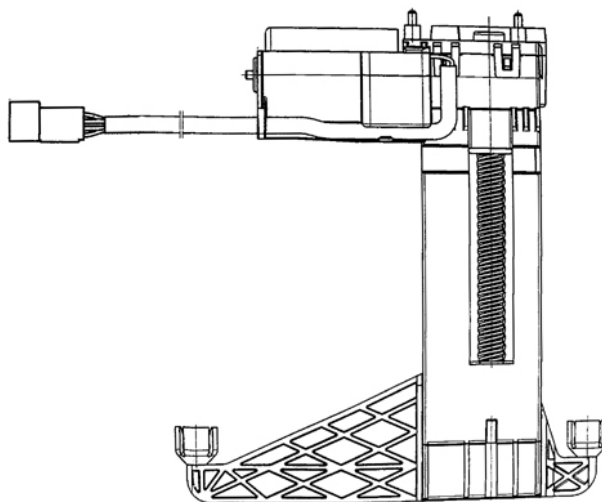
Přes šnek se přenáší síla na vřeteno, na kterém je vlastní opěrka, kterou už zná každý řidič. Pro tlumení je místo přenášení síly z ozubeného šneku na vřeteno zalito tukem. To vše je umístěno v plastovém krytu, který vidíme na obrázku 25.



Obrázek 25: Plastový kryt



Dohromady tvoří opěrka kompaktní celek jak vidíme na obrázku 26.



Obrázek 26: Konstrukce hlavové opěrky

## 5 Měření a analýza

Ve vytvořeném měřicím projektu tedy měříme časové průběhy vibrací, hluku a napájecího proudu. Dalšími funkcemi analyzátoru zobrazíme průběhy a hodnoty, které budou důležité z hlediska analýzy. Jsou to tedy kromě časových průběhů

- spektra vibrací,
- spektra hluku,
- spektra proudu,
- celková hodnota vibrací a hluku,
- maximální hodnota hluku během měření.

### 5.1 Postup měření

K analýze bylo firmou Bühler Motor Hradec Králové poskytnuto 14 hlavových opěrek. Z toho byly 3 opěrky firmou určeny jako dobré (opěrky č.101,107 a 114). Na základě měření těchto opěrek byly určeny příznaky pro vyhodnocování dobrých opěrek. Další 4 opěrky byly při výrobě vyřazeny subjektivní kontrolou (opěrky č.110-113). Zbytek opěrek byl vyřazen měřením ve zkušebně zmíněné firmy.

Měření byla prováděna v akustické komoře a každá opěrka byla proměřena minimálně 2krát v každém směru posuvu opěrky. Příklad značení opěrek *101-od-1*, znamená, že byla měřena opěrka č.101 ve směru *OD* motorku (v našem případě ve směru dolů) a jedná se o první měření.

Pokud nebude řečeno jinak opěrka je měřena s vlastnostmi od výrobce, tzn. tvrdá pružná spojka a malé množství tuku v místě dosedání ozubeného šneku na vřeteno s opěrkou. Ve všech měřeních, kromě posledního, byla opěrka napájena 12 V.

Frekvenci otáčení motorku určíme ze spektra měřeného proudu, kde je patrná desátá harmonická frekvence otáčení.

## 5.2 Měření s různými stupni zátěže

V tomto měření se pokusíme charakterizovat chování opěrek s různým zatížením. Opěrky nejdříve změříme bez zátěže a poté se zatížením 4 kg. Zaměříme se především na hodnoty vibrací.

### 5.2.1 Naměřené hodnoty

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 4.

Charakteristika měření: opěrky měřeny bez zátěže a se zátěží 4 kg, s tvrdou spojkou, množstvím tuku od výrobce a napájením 12 V.

### 5.2.2 Zhodnocení měření

Jak vidíme z tabulky naměřených hodnot dá se říci, že dobré opěrky (č. 101,107 a 114) vykazují při měření bez zatížení velmi podobné hodnoty celkových vibrací jako opěrky špatné. U některých špatných opěrek se však vyskytují rázy (viz. obrázek 27), které se projevují ve frekvenčním spektru ve vyšších frekvencích. Jiné špatné opěrky vykazují jakoby "dokmitávání", pro které je charakteristické pásmo frekvencí 600-1000 Hz. Při podrobné analýze spekter byla nakonec rozeznána 3 důležitá pásma pro rozeznávání kvality opěrek.

- 1.pásmo 225 – 425 Hz
- 2.pásmo 600 – 1000 HZ
- 3.pásmo 2000 – 3200 Hz

Z měření vyplývá, že opěrky všeobecně méně vibrují se zatížením než-li bez zatížení. Avšak ve spektrech se zatížením můžeme zřetelněji rozeznat zmíněná pásma jak je vidět na obrázku 28. Zvláště výrazná jsou pásma 1 a 2. Pro zatížení 4 kg byly stanoveny tyto referenční hodnoty pro dobré opěrky

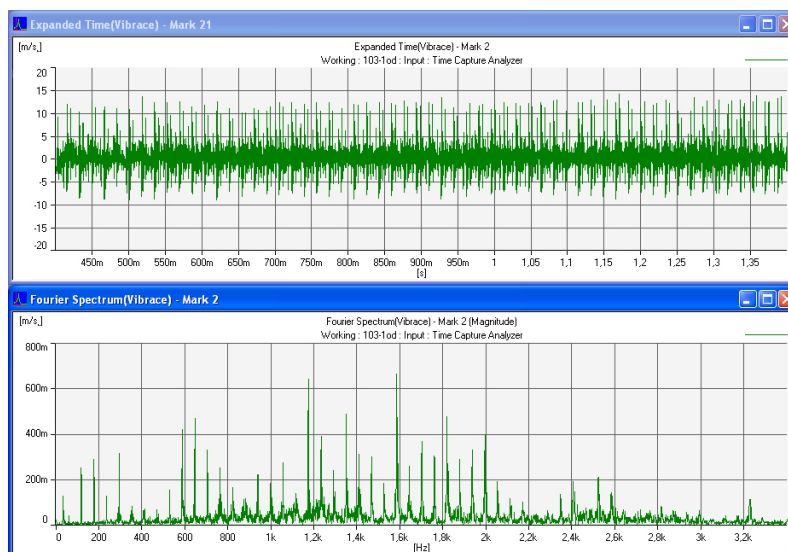
- celkové vibrace ve směru  $OD$  do  $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,
- celkové vibrace ve směru  $K$  do  $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,
- do 40% výkonu v pásmu 1 ve směru  $OD$ ,

- do 60% výkonu v pásmu 2 ve směru *OD*,
- do 30% výkonu v pásmu 1 ve směru *K*,
- do 55% výkonu v pásmu 2 ve směru *K*.

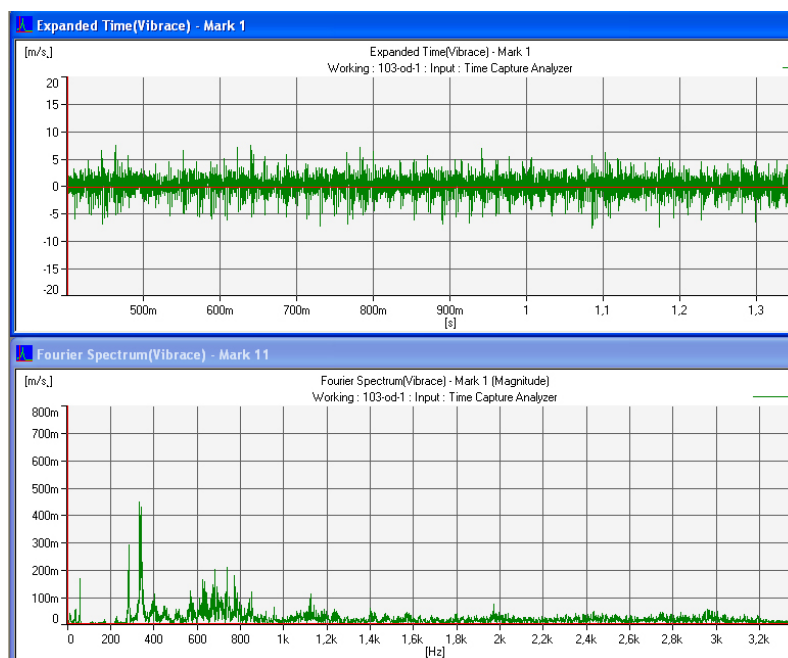
Hodnoty jsou různé pro směry *OD* a *K*, protože jak bylo zmíněno, ve směru *OD* je opěrka "stahována" závažím dolů a naopak ve směru *K* opěrka toto závaží "vytahuje" zpět nahoru. Opěrka se tedy chová v každém směru jinak.

	bez zátěže					zátěž 4kg				
	celkové	pásma vibrací			otáčky	celkové	pásma vibrací			otáčky
	vibrace [m/s <sup>2</sup> ]	1 %	2 %	3 %	[sec <sup>-1</sup> ]	vibrace [m/s <sup>2</sup> ]	1 %	2 %	3 %	[sec <sup>-1</sup> ]
101-od	2.51	40.0	45.7	28.8	59	1.58	39.0	49.1	46.4	56
101-k	2.15	36.6	49.8	49.5	60	0.92	29.8	39.5	39.0	50
102-od	2.83	23.4	60.2	26.6	60	2.47	41.2	52.1	48.3	57
102-k	2.28	33.5	63.3	36.5	60	1.44	24.7	38.4	67.3	50
103-od	2.89	16.9	38.1	33.6	59	1.57	50.8	57.5	30.9	56
103-k	2.60	32.2	41.3	48.8	60	1.01	28.2	37.1	44.5	50
105-od	2.34	20.8	68.2	30.6	59	1.92	54.5	52.2	38.5	57
105-k	2.56	40.4	48.2	51.1	59	1.35	40.1	42.8	34.6	47
106-od	2.55	35.2	44.0	42.4	59	1.94	28.3	63.9	38.5	50
106-k	2.88	40.5	31.4	69.5	60	1.41	29.4	56.1	34.6	49
107-od	2.49	19.0	47.3	25.9	59	1.62	35.7	52.0	38.5	58
107-k	2.66	22.0	44.8	52.1	60	1.37	26.0	51.5	34.6	50
108-od	1.81	29.3	42.3	34.7	59	3.20	34.2	68.9	20.9	57
108-k	2.77	31.6	38.6	52.7	59	2.73	12.8	77.8	31.3	48
109-od	2.12	16.7	62.8	36.4	59	1.78	27.6	61.4	42.4	59
109-k	1.80	17.3	64.6	34.4	59	1.14	38.1	38.8	47.1	49
110-od	1.47	31.4	53.5	47.5	60	1.88	38.1	69.6	30.9	59
110-k	2.07	28.3	69.6	42.0	59	1.13	40.6	47.1	31.5	48
111-od	2.42	17.8	60.5	46.3	60	4.06	25.5	78.3	32.5	50
111-k	3.48	31.0	55.5	48.9	59	1.41	22.7	46.0	27.0	47
112-od	2.63	12.4	72.5	42.2	58	2.92	43.0	64.3	30.5	55
112-k	1.72	23.7	42.2	57.9	60	1.18	37.6	42.0	35.5	50
113-od	2.49	8.8	73.3	29.2	60	2.78	35.9	76.0	19.7	50
113-k	1.74	29.3	72	29.8	59	1.16	20.2	45.6	32.5	50
114-od	1.81	18.4	51.2	51.9	60	1.70	29.9	70.8	43.8	55
114-k	2.22	19.1	71.1	43.2	60	1.55	25.0	41.3	40.2	50

Tabulka 4: Měření vibrací bez zátěže a se zátěží 4kg



Obrázek 27: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - bez zátěže



Obrázek 28: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - zátěž 4kg

### 5.3 Měření s různou tvrdostí pružné spojky

V tomto měření se zaměříme na vliv pružné spojky na celkové vibrace. K dispozici máme tři druhy tvrdosti spojek. Tvrdou, která se nyní používá ve výrobě, středně tvrdou a velmi měkkou spojku.

V tomto měření budeme také simulovat reálné zatížení opěrky a to zatížením 4 kg zavěšenými na opěrku. Ve směru *OD* je tedy opěrka stahována závažím směrem dolů a ve směru *K* opěrka naopak vytahuje závaží sebou nahoru.

Pásmo ve spektru vibrací jsou určena z předcházejícího měření.

Všechny ostatní podmínky měření jsou shodné s předcházejícím testem.

#### 5.3.1 Naměřené hodnoty

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulkách 5, 6 a 7.

Charakteristika měření: opěrky měřeny se zátěží 4 kg, s různou tvrdostí spojky, množstvím tuku od výrobce a napájením 12 V.

	celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
	vibrace [m/s <sup>2</sup> ]	hluk [mPa]	exp+ [dB]	peak [dB]	1 %	2 %	3 %	[sec <sup>-1</sup> ]
<b>101-od</b>	1.58	17.9	57.0	71.1	39.0	49.1	46.4	56
<b>101-k</b>	0.92	14.6	57.0	74.0	29.8	39.5	39.0	50
<b>102-od</b>	2.47	30.0	53.5	73.4	41.2	52.1	48.3	57
<b>102-k</b>	1.44	18.5	53.2	72.9	24.7	38.4	67.3	50
<b>103-od</b>	1.57	20.7	53.7	72.9	50.8	57.5	30.9	56
<b>103-k</b>	1.01	18.9	51.9	76.9	28.2	37.1	44.5	50
<b>105-od</b>	1.92	24.9	57.3	79.3	54.5	52.2	38.5	57
<b>105-k</b>	1.35	18.0	53.3	71.8	40.1	42.8	34.6	47
<b>106-od</b>	1.94	17.2	56.9	73.2	28.3	63.9	38.5	50
<b>106-k</b>	1.41	19.0	55.6	70.7	29.4	56.1	34.6	49
<b>107-od</b>	1.62	27.6	53.1	75.8	35.7	52.0	38.5	58
<b>107-k</b>	1.37	17.1	58.1	69.8	26.0	51.5	34.6	50
<b>108-od</b>	3.20	21.1	56.2	73.5	34.2	68.9	20.9	57
<b>108-k</b>	2.73	24.6	60.6	73.8	12.8	77.8	31.3	48
<b>109-od</b>	1.78	17.1	53.2	77.4	27.6	61.4	42.4	59
<b>109-k</b>	1.14	15.2	54.0	74.1	38.1	38.8	47.1	49
<b>110-od</b>	1.88	24.3	54.1	73.9	38.1	69.6	30.9	59
<b>110-k</b>	1.13	18.3	58.7	82.6	40.6	47.1	31.5	48
<b>111-od</b>	4.06	19.5	51.9	74.8	25.5	78.3	32.5	50
<b>111-k</b>	1.41	24.5	51.4	73.6	22.7	46.0	27.0	47
<b>112-od</b>	2.92	27.2	56.8	73.7	43.0	64.3	30.5	55
<b>112-k</b>	1.18	18.7	52.0	76.0	37.6	42.0	35.5	50
<b>113-od</b>	2.78	15.9	52.8	73.8	35.9	76.0	19.7	50
<b>113-k</b>	1.16	12.7	49.8	73.5	20.2	45.6	32.5	50
<b>114-od</b>	1.70	19.5	50.0	78.6	29.9	70.8	43.8	55
<b>114-k</b>	1.55	20.0	55.9	69.9	25.0	41.3	40.2	50

Tabulka 5: Měření vibrací a hluku - tvrdá spojka



	celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
	vibrace [m/s <sup>2</sup> ]	hluk [mPa]	exp+ [dB]	peak [dB]	1 %	2 %	3 %	[sec <sup>-1</sup> ]
<b>101-od</b>	1.74	25.4	59.6	73.3	59.7	30.3	43.6	55
<b>101-k</b>	1.12	16.9	58.0	72.4	37.0	39.3	51.1	46
<b>102-od</b>	2.08	32.9	59.6	75.3	38.0	54.3	38.5	50
<b>102-k</b>	1.18	19.2	59.3	74.2	23.3	46.5	57.8	48
<b>103-od</b>	1.81	24.8	61.1	73.1	46.4	50.5	30.7	56
<b>103-k</b>	2.53	20.5	59.9	77.9	27.9	41.7	41.8	48
<b>105-od</b>	1.27	25.3	59.2	74.5	52.8	44.3	57.8	56
<b>105-k</b>	1.12	23.0	59.1	71.9	17.8	56.2	48.7	47
<b>106-od</b>	2.54	19.2	60.3	74.8	30.5	44.3	36.1	55
<b>106-k</b>	2.47	23.8	58.7	74.7	29.5	50.3	48.9	46
<b>107-od</b>	1.75	27.1	60.0	73.7	33.3	60.7	35.7	58
<b>107-k</b>	1.56	21.9	58.2	78.9	36.6	34.9	18.0	48
<b>108-od</b>	1.65	18.0	59.7	73.9	20.2	75.1	21.4	56
<b>108-k</b>	2.17	21.6	57.9	74.1	16.1	43.0	24.2	47
<b>109-od</b>	1.67	21.2	56.9	76.2	58.9	36.6	43.1	58
<b>109-k</b>	2.17	16.1	56.7	73.5	24.0	45.1	60.4	47
<b>110-od</b>	1.36	17.7	56.0	73.9	28.4	69.1	33.6	54
<b>110-k</b>	1.18	14.0	56.5	79.4	40.7	44.8	39.9	47
<b>111-od</b>	3.62	19.9	56.4	74.5	41.4	70.9	22.8	54
<b>111-k</b>	1.17	17.5	58.6	73.3	29.5	33.7	47.6	46
<b>112-od</b>	1.82	17.6	57.2	74.6	52.2	41.0	43.8	59
<b>112-k</b>	1.04	18.6	58.5	73.3	24.2	53.6	44.0	49
<b>113-od</b>	2.60	20.6	57.8	75.1	38.3	71.0	27.8	60
<b>113-k</b>	0.98	19.3	58.0	86.0	22.8	45.4	40.7	43
<b>114-od</b>	1.51	19.6	56.8	79.1	41.9	55.7	45.7	50
<b>114-k</b>	1.63	18.7	58.8	70.9	20.0	28.3	33.0	41

Tabulka 6: Měření vibrací a hluku - středně tvrdá spojka

	celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
	vibrace [ $m/s^2$ ]	hluk [ $mPa$ ]	exp+ [ $dB$ ]	peak [ $dB$ ]	1 %	2 %	3 %	[ $sec^{-1}$ ]
<b>101-od</b>	1.30	20.3	57.7	73.2	29.2	45.5	53.6	55
<b>101-k</b>	0.87	19.4	57.8	73.3	38.2	44.2	46.7	47
<b>102-od</b>	2.04	24.6	57.9	72.9	22.9	39.0	63.1	58
<b>102-k</b>	1.55	18.2	62.8	74.9	16.1	36.1	74.4	47
<b>103-od</b>	1.40	15.9	58.0	74.7	37.3	45.1	32.4	56
<b>103-k</b>	1.11	17.1	57.9	74.1	53.6	30.7	41.3	47
<b>105-od</b>	1.18	18.2	57.7	74.2	35.5	61.4	47.2	56
<b>105-k</b>	1.02	18.7	57.4	72.2	19.6	60.2	50.8	47
<b>106-od</b>	2.68	20.8	57.7	75.3	21.6	56.5	54.2	57
<b>106-k</b>	2.06	16.6	57.6	71.1	25.2	53.3	63.7	48
<b>107-od</b>	1.49	15.7	58.8	71.9	36.9	43.6	50.5	50
<b>107-k</b>	1.31	16.8	58.6	70.1	28.0	69.5	37.5	50
<b>108-od</b>	1.23	15.9	58.5	72.0	39.2	53.8	36.0	56
<b>108-k</b>	1.33	18.5	59.4	72.8	16.6	57.7	52.6	47
<b>109-od</b>	2.15	19.7	56.4	74.9	57.0	24.8	45.9	59
<b>109-k</b>	1.09	16.2	56.1	74.4	33.9	43.6	47.8	48
<b>110-od</b>	1.33	19.3	56.6	75.5	32.8	50.2	43.8	59
<b>110-k</b>	1.21	19.7	56.0	85.9	28.1	43.6	56.7	47
<b>111-od</b>	4.26	19.6	56.2	74.8	52.0	62.4	27.3	58
<b>111-k</b>	1.21	17.2	57.2	72.2	27.2	30.8	39.5	42
<b>112-od</b>	2.23	18.0	55.9	74.1	41.3	35.1	49.4	59
<b>112-k</b>	1.05	15.9	57.4	86.5	32.3	44.4	41.6	49
<b>113-od</b>	1.97	21.4	62.6	76.2	25.4	71.1	19.3	44
<b>113-k</b>	1.30	16.5	57.7	77.0	14.4	70.8	21.4	31
<b>114-od</b>	1.63	33.4	58.3	80.9	50.7	59.4	23.9	55
<b>114-k</b>	1.50	21.4	61.9	73.6	53.5	42.9	37.1	43

Tabulka 7: Měření vibrací a hluku - měkká spojka

### 5.3.2 Zhodnocení měření

Toto měření má za cíl zjistit jaký vliv na celkové vibrace má pružná spojka. Po nahlédnutí do tabulek je zřejmé, že hodnota vibrací klesla. U některých špatných opěrek poměrně výrazně. Je tedy velmi pravděpodobné, že plastové díly způsobují nesouososti a tato spojka je eliminuje. Měkká spojka zřejmě nejlépe.

#### Výsledky pro směr OD:

- 61.5% opěrek kmitá nejméně s měkkou spojkou
- 30.8% opěrek kmitá nejméně se středně tvrdou spojkou
- 7.7% opěrek kmitá nejméně s tvrdou spojkou.

#### Výsledky pro směr K:

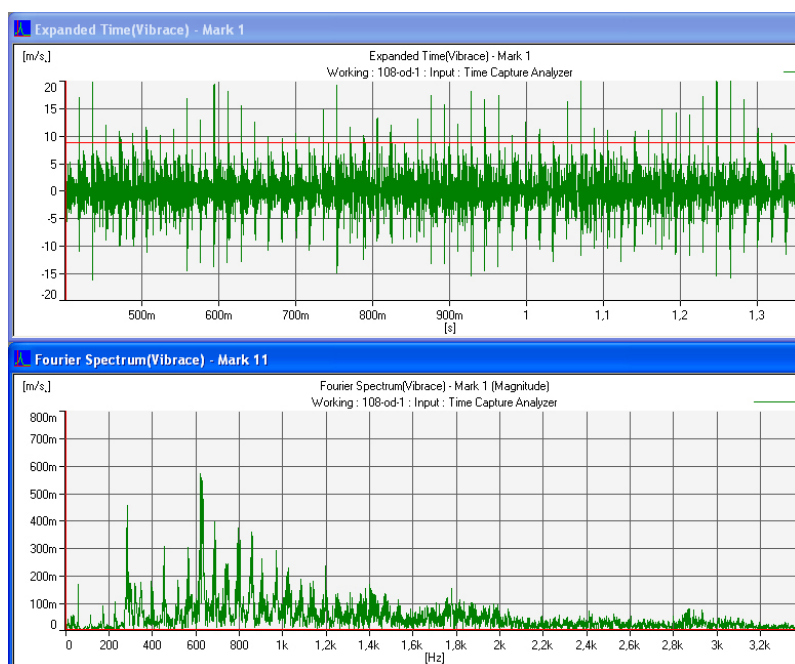
- 42.2% opěrek kmitá nejméně s měkkou spojkou
- 30.7% opěrek kmitá nejméně se středně tvrdou spojkou
- 23.1% opěrek kmitá nejméně s tvrdou spojkou.

Z měření vyplývá, že 92.3% opěrek pro směr OD a 76.9% opěrek pro směr K vykazuje nižší hodnoty vibrací než s tvrdou spojkou, která se nyní používá ve výrobě. U těchto nižších vibrací je vidět, že energie ve spektru se poměrně vyrovná a vyhodnocování pásem už není podstatné (viz. obrázky 29 a 30). To se týká vibrací pod  $1.4m \cdot s^{-2}$ .

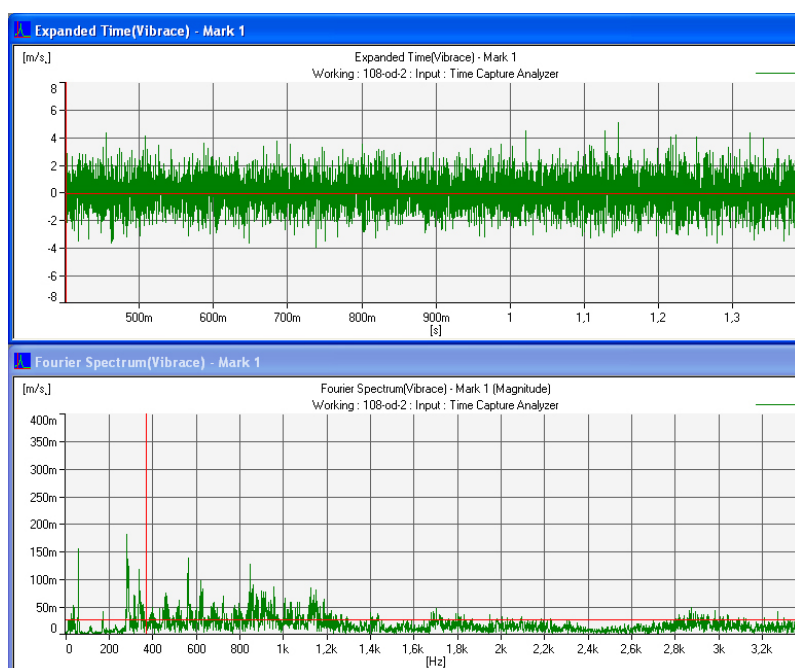
Měření vibrací považuji u tohoto produktu za podstatnější než měření hluku. Jednotlivá měření hluku u stejných opěrek se liší až o 30 %. Hodnoty vibrací se liší maximálně o 10 %. Také ani po podrobné analýze rozložení frekvencí ve Fourier spektru nebyl objeven žádný průkazný příznak. Zřejmě ani CPB analýza by nebyla prokazatelnější. Z měření hluku považuji za nejpodstatnější příznaky Exp a Peak.

Bylo provedeno i experimentální měření opěrky s pevným spojením mezi motorkem a hřídelí a podle očekávání byla opěrka naprosto "nepoužitelná".

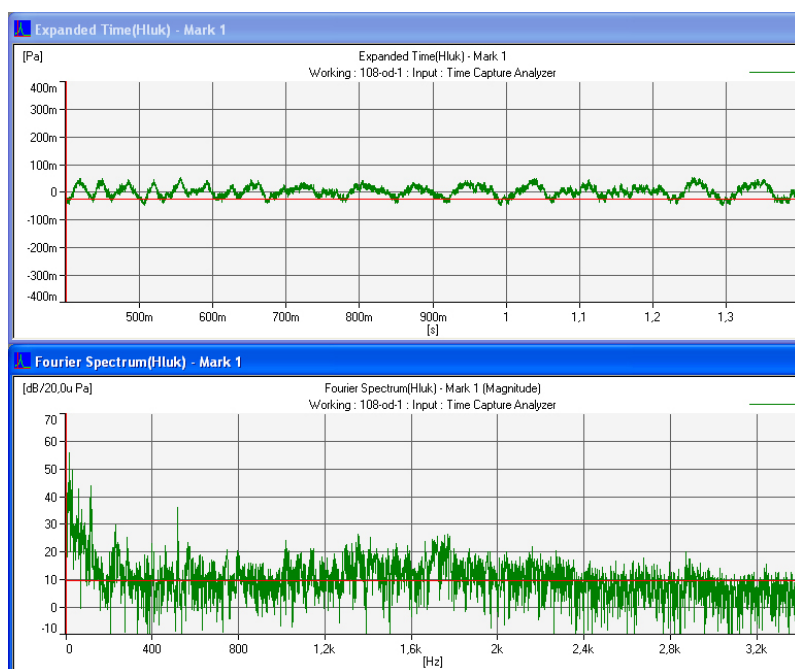
Na závěr tohoto měření nutno podotknout, že při výměně spojky muselo dojít k vylovení zácvaků u krytu opěrky a manuální úpravě opěrky. To mohlo vést k částečným změnám chování opěrek.



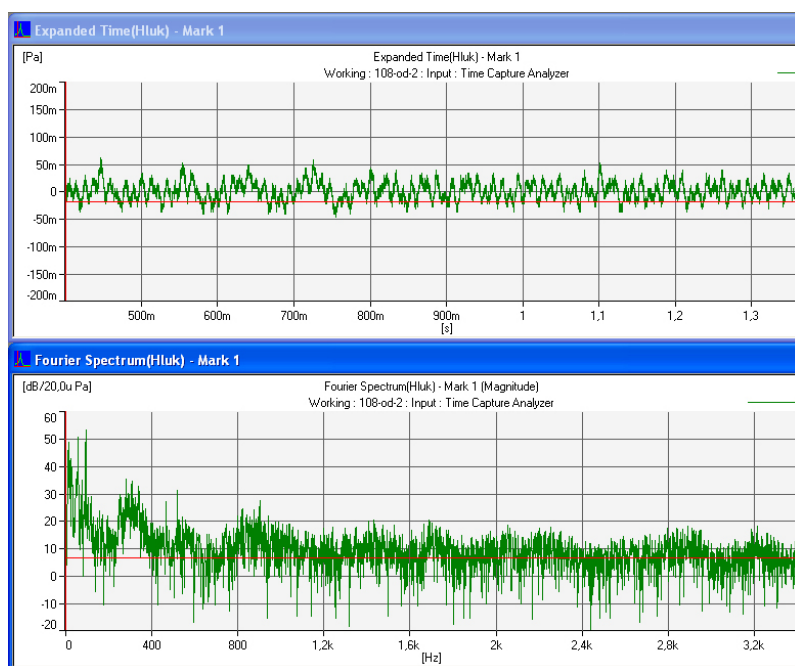
Obrázek 29: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - tvrdá spojka



Obrázek 30: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - měkká spojka



Obrázek 31: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - tvrdá spojka



Obrázek 32: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - měkká spojka

## 5.4 Měření s různým množstvím tuku

Díky tomuto měření zjistíme vliv tuku na projev opěrky, který je napouštěn výrobcem do místa, kde šnekové kolo přenáší sílu na šnek vřetena s opěrkou. Nejprve provedeme měření absolutně bez tuku a následně porovnáme s měřením, kde je tuk v množství dodaném výrobcem. Nakonec provedeme měření s maximálním množstvím tuku, které je možné napustit do tohoto místa.

Podmínky měření jsou shodné s předešlými. Opěrku budeme opět zatěžovat závažím o hmotnosti 4 kg.

### 5.4.1 Naměřené hodnoty

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulkách.

Charakteristika měření: opěrky měřeny bez zátěže a se zátěží 4 kg, s tvrdou spojkou, proměnlivým množstvím tuku a napájením 12 V.

		celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
		vibrace [m/s <sup>2</sup> ]	hluk [mPa]	exp+ [dB]	peak [dB]	1 %	2 %	3 %	
bez tuku	101-od	3.21	15.2	61.2	72.9	44.0	30.2	64.3	58
	101-k	2.01	13.4	56.9	71.6	28.9	30.5	74.1	59
málo tuku	101-od	2.21	13.1	61.6	75.2	30.6	26.6	45.3	58
	101-k	1.61	13.1	57.7	72.8	31.9	24.8	68.9	59
hodně tuku	101-od	1.81	13.3	63.2	74.8	68.2	32.2	34.8	58
	101-k	1.38	17.6	57.9	77.2	32.0	25.5	62.4	58
bez tuku	107-od	1.77	13.5	65.8	74.1	32.2	40.1	48.0	59
	107-k	1.94	15.4	56.4	75.0	53.7	46.5	31.8	60
málo tuku	107-od	1.34	13.4	60.5	74.9	55.4	39.1	41.0	57
	107-k	0.87	12.6	56.0	72.4	31.5	51.6	40.9	58
hodně tuku	107-od	1.31	13.4	60.8	74.1	48.1	39.0	43.7	59
	107-k	1.52	15.0	57.2	71.5	41.1	40.1	23.5	59

Tabulka 8: Měření vibrací a hluku - různé množství tuku, bez zátěže

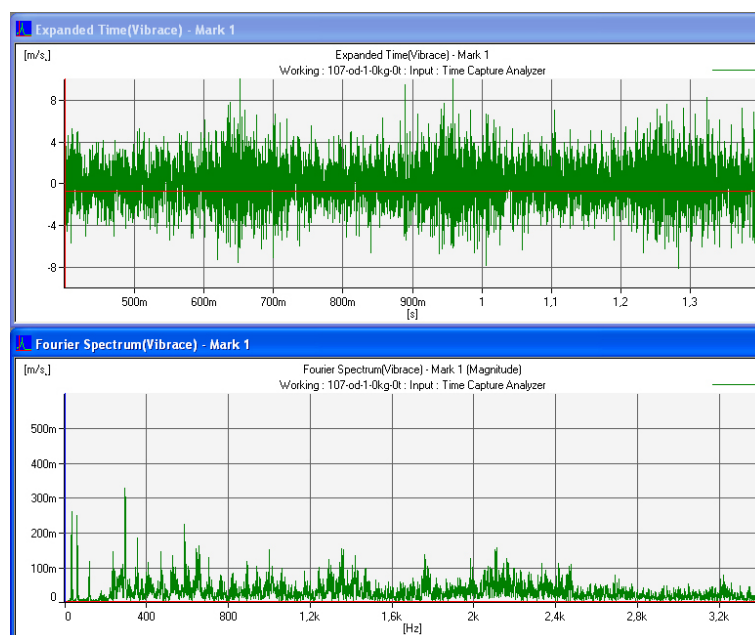
		celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
		vibrace [ $m/s^2$ ]	hluk [ $mPa$ ]	exp+ [ $dB$ ]	peak [ $dB$ ]	1 %	2 %	3 %	[ $sec^{-1}$ ]
bez tuku	101-od	2.06	15.6	58.8	79.3	45.4	33.9	52.7	54
	101-k	1.45	22.2	61.8	71.9	28.2	46.1	54.8	45
málo tuku	101-od	2.01	22.1	60.4	79.8	59.6	39.8	43.5	55
	101-k	1.27	23.0	67.1	74.9	37.4	39.3	62.1	47
hodně tuku	101-od	1.32	16.3	60.4	79.1	52.9	38.3	44.4	54
	101-k	1.50	41.7	66.5	74.9	45.8	34.8	48.3	46
bez tuku	107-od	2.32	19.6	58.3	75.7	18.4	74.1	48.3	55
	107-k	1.59	38.4	61.9	73.5	22.0	61.5	51.8	44
málo tuku	107-od	1.85	21.9	60.6	77.0	27.7	69.9	40.4	56
	107-k	1.29	24.3	62.5	74.6	32.5	59.3	43.0	45
hodně tuku	107-od	2.08	21.5	58.3	76.0	19.6	80.0	43.0	56
	107-k	1.14	23.7	64.2	74.8	32.0	54.3	53.9	45

Tabulka 9: Měření vibrací a hluku - různé množství tuku, zátěž 4kg

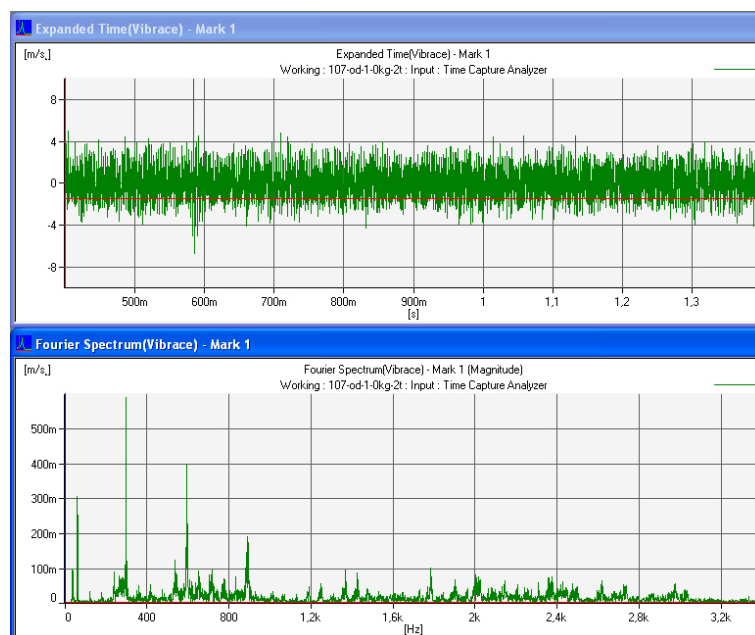
#### 5.4.2 Zhodnocení měření

Z naměřených hodnot vidíme, že i množství tuku má vliv na celkové vibrace a hluk. U obou měřených opěrek jak u měření bez zátěže tak se zátěží došlo ke snížení celkových vibrací. Jak se dalo předpokládat toto místo je zdrojem vibrací a tuk ho pomáhá tlumit. Hodnocení vlivu množství tuku na hluk je obtížnější. Z tabulek vidíme, že u jedné opěrky došlo k mírnému zlepšení a u druhé k mírnému zhoršení. Jak bylo řečeno u minulého experimentu, u hluku dochází k velkým výchyldkám jednotlivých měření, proto bych kladl větší důraz na hodnocení vibrací.

Chodem opěrky však dochází k postupnému vytlačování tuku od pohyblivých částí a tím se i zmenšuje jeho účinek. Je tedy otázkou zda by použité velké množství tuku mělo vliv na zlepšení vlastností opěrek na delší čas nebo by po nějaké době byl výsledný efekt stejný jako s množstvím používaným doposud.

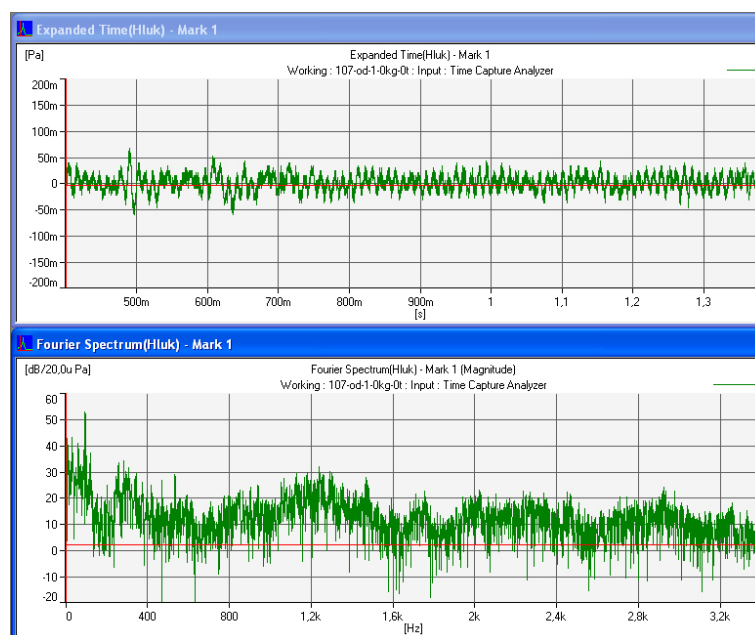


Obrázek 33: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - bez tuku, bez zatížení

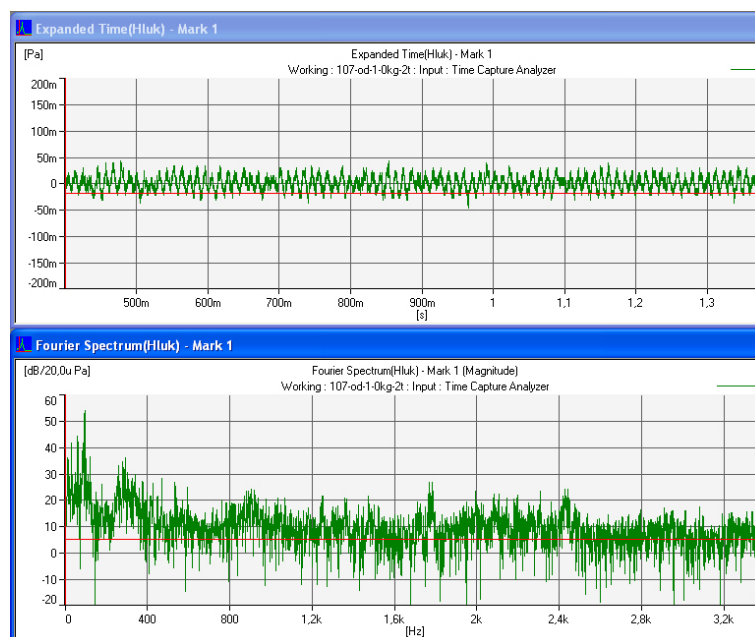


Obrázek 34: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - s velkým množstvím tuku, bez zatížení





Obrázek 35: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - bez tuku, bez zatížení



Obrázek 36: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - s velkým množstvím tuku, bez zatížení

## 5.5 Měření jednotlivých částí opěrky

V tomto měření se pokusíme zjistit, které části opěrky nejvíce způsobují vibrace. První měření provedeme bez vlastní opěrky tzn. bez pojízdné části na vřetenu. Další měření provedeme bez vřetena tzn. do měření nebude zahrnut přenos sil ze šnekového kola na šnek vřetena. A další měření bude pouze se samotným motorkem.

### 5.5.1 Naměřené hodnoty

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulkách .

Charakteristika měření: opěrky měřeny bez zátěže, tam kde je při měření ozubený šnek je použita tvrdá spojka, množstvím tuku od výrobce a napájením 12 V.

### 5.5.2 Zhodnocení měření

Z měření vidíme, že postupným přidáváním částí narůstají vibrace. Naměřené hodnoty hluku zůstávají přibližně stejné pro všechny měření. Při měření pouze se šnekovým kolem jsou v časové oblasti zřejmé rázy, které jsou zastoupeny ve spektru vibrací v celé šíři pásma. Jsou zřejmě způsobeny nesouosostmi plastových částí a i když je pružná spojka částečně eliminuje, nedaří se jí to v plné míře. Zde se nabízí řešení z minulého měření, tedy použít měkkí spojku.

Dalším zřejmým zdrojem vibrací, které měření potvrdilo, je místo kontaktu šnekového kola a šneku vřetena. Z časového průběhu vidíme, že po přidání vřetena rapidně narostla celková hodnota vibrací. Ve spektru vidíme nárůst nižších frekvencí. Tyto vibrace by zřejmě mohlo, jak potvrdilo předcházející měření, částečně tlumit dostatečné množství tuku.

Důležitým faktorem však zůstává přesnost vyrobených a použitých plastových částí opěrky, ve kterých jsou uloženy zmíněné části. Zde je tedy zapotřebí pravidelně kontrolovat výrobní tolerance a eliminovat drobné nepřesnosti, které následně způsobují nesouososti točivých částí a způsobují nežádoucí vibrace.

		celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
		vibrace [ $m/s^2$ ]	hluk [ $mPa$ ]	exp+ [ $dB$ ]	peak [ $dB$ ]	1 %	2 %	3 %	[ $sec^{-1}$ ]
vřeteno	101-od	2.43	14.0	56.9	68.4	15.2	30.3	35.9	58
	101-k	1.61	15.8	57.5	69.3	54.4	37.0	36.1	59
šnek	101-od	1.37	14.3	56.4	68.0	48.1	22.7	46.7	58
	101-k	2.52	12.6	56.5	68.7	94.0	12.0	16.5	59
motorek	101-od	1.25	13.2	56.7	67.6	73.8	25.0	48.7	59
	101-k	2.50	13.0	56.1	68.4	94.4	22.8	18.0	61
vřeteno	107-od	1.47	13.4	56.2	68.4	47.7	33.8	34.1	59
	107-k	2.38	15.8	57.7	67.6	67.9	16.0	33.0	60
šnek	107-od	0.79	12.9	57.0	68.0	43.4	27.5	31.7	60
	107-k	1.04	15.7	59.8	72.6	64.5	35.1	26.3	60
motorek	107-od	0.76	18.0	58.4	69.2	64.8	41.6	25.6	60
	107-k	0.98	45.3	59.5	72.7	73.7	52.7	12.5	61
vřeteno	112-od	5.39	16.4	58.0	73.0	13.4	55.3	43.7	60
	112-k	2.36	15.7	57.0	72.6	28.8	55.0	50.3	60
šnek	112-od	1.46	13.5	56.5	69.8	8.4	57.8	39.3	60
	112-k	1.40	13.3	56.4	68.0	28.6	58.6	44.7	60
motorek	112-od	1.18	14.7	57.8	70.4	40.0	53.9	24.3	61
	112-k	1.17	12.9	56.3	68.4	52.1	45.7	24.4	61

Tabulka 10: Měření vibrací a hluku - různé části opěrky

## 5.6 Měření opěrky s různým napájecím napětím

V tomto měření budeme motorek napájet různým napětím (9-15 V). Pokusíme se tedy najít ideální napájecí napětí pro tyto opěrky, při kterém by měl motorek ještě dostatečné otáčky ale vibrace by mohly být nižší.

### 5.6.1 Naměřené hodnoty

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulkách .

Charakteristika měření: opěrky měřeny se zátěží 4 kg, s tvrdou spojkou, množstvím tuku od výrobce a proměnným napájecím napětím 9-15 V.

### 5.6.2 Zhodnocení měření

V výsledků vyplývá, že s nižším napájecím napětím také klesají vibrace. Je tedy na zváženu zda použít nižší napětí, např. 11 V, za cenu nižších otáček motorku oproti standardně používaných 12 V. Naproti tomu použití vyššího napětí už nepřichází v úvahu. Vibrace s vyšším napájecím napětím rychle narůstají a opěrka je poměrně hlučnější.

		celkové		hluk		pásma vibrací			otáčky
		vibrace [ $m/s^2$ ]	hluk [ $mPa$ ]	exp+ [ $dB$ ]	peak [ $dB$ ]	1 %	2 %	3 %	[ $sec^{-1}$ ]
9 V	101-od	1.00	19.8	59.8	72.7	34.7	53.2	33.2	41
	101-k	0.76	10.0	55.6	76.6	65.8	38.1	38.0	34
9.5 V	101-od	0.99	16.5	61.8	72.2	27.0	57.8	34.6	43
	101-k	0.70	12.3	57.3	77.3	54.1	41.1	41.8	33
10 V	101-od	1.09	16.2	63.3	72.9	39.1	58.8	37.8	45
	101-k	0.76	14.8	58.9	74.9	46.5	40.3	44.8	34
10.5 V	101-od	1.18	14.5	58.0	72.6	32.9	61.0	35.9	48
	101-k	0.82	24.2	59.4	85.4	38.2	38.1	43.8	38
11 V	101-od	1.27	19.7	59.2	71.9	32.4	62.1	45.0	51
	101-k	0.88	28.2	61.9	70.7	32.2	33.1	44.1	41
11.5 V	101-od	1.42	18.6	57.6	72.7	36.7	57.9	47.5	53
	101-k	0.93	20.5	54.2	73.0	26.9	33.0	44.6	44
12 V	101-od	1.60	16.7	55.2	72.6	45.3	54.2	41.8	56
	101-k	1.00	17.3	58.9	70.7	37.6	36.1	46.8	46
12.5 V	101-od	1.66	26.9	54.9	74.9	43.6	56.3	38.2	59
	101-k	0.49	16.3	53.3	71.1	77.0	81.5	92.1	49
13 V	101-od	1.74	30.1	55.6	74.2	26.7	66.4	43.1	62
	101-k	1.07	16.9	51.7	73.1	42.3	38.7	52.8	52
13.5 V	101-od	1.88	23.6	55.3	75.1	20.3	67.6	45.4	64
	101-k	1.15	23.2	52.4	72.9	49.9	35.9	43.8	54
14 V	101-od	2.07	16.8	54.2	73.9	15.9	68.8	45.1	67
	101-k	1.16	19.7	53.2	75.1	55.3	38.0	39.6	56
14.5 V	101-od	2.24	19.2	53.2	72.9	13.9	72.3	44.4	69
	101-k	1.15	22.3	51.7	73.9	53.4	39.0	41.7	57
15 V	101-od	2.24	19.9	55.5	73.8	13.7	71.9	44.2	70
	101-k	1.14	22.5	52.8	73.8	52.8	39.6	41.1	57

Tabulka 11: Měření vibrací a hluku - různé napájecí napětí

## Závěr

Kontrola rozměrů a jiných veličin dílčích částí výrobku během výroby je nutným předpokladem kontroly jakosti. U kompletně smontovaných hlavových opěrek lze zejména efektivně provést analýzu vibrací a hluku, které jsou rozhodující při hodnocení kvality. Tato kontrola je také zahrnuta ve výrobním procesu a je její nezbytnou součástí.

Pro analýzu byly výrobcem hlavových opěrek pro automobily BMW řady 5, 7 a X5 firmou Bühler Motor Hradec Králové poskytnuty vzorky výrobků, jak dobrých kusů tak kusů, které byly vyřazeny interní kontrolou ve firmě. Tato kontrola se skládá z měření vibrací akcelerometrem a před prohlášením výrobku za dobrý je ještě podroben subjektivní kontrole. Taktéž byla firmou poskytnuta technická dokumentace popisující konstrukci hlavových opěrek.

Analýza frekvenčních spekter vibrací potvrdila prvotní odhady, tedy možné špatné dosedání šnekového kola hnací hřídele na šnek vřetena s opěrkou a zároveň možný nedokonalý přenos sil z motorku na šnekové kolo přes pružnou spojku. Další měření, které bylo zaměřeno právě na tuto spojku zjistilo, že velkou roli na vibrace a hluk opěrek hraje tvrdost použité spojky. Pro měření byly použity tři tvrdosti spojek, které výrazně ovlivňovali celkové vibrace a hluk. Pružná spojka je v konstrukci opěrky se záměrem tlumit tolerance a nestabilitu plastových součástí. Z měření vyplývá že tvrdá spojka, která se používá nyní ve výrobě, tyto tolerance tlumí nedostatečně. Proto doporučuji používat měkkou spojku, která tlumí vibrace daleko lépe. Zmíněné tolerance plastových součástí potvrdilo i opakování měření odlišnostmi spekter vibrací a hlavně hluku jednotlivých měření stejných opěrek. Tyto odlišnosti jsou právě způsobeny nepřesným dosedáním hřídele šnekového kola v plastových dílech. Dalším faktorem, který zlepšuje vlastnosti opěrek je použitý tuk, který vyhladí přechod mezi šnekovým kolem a vřetenem s opěrkou.

Pro celkovou kvalitu produktu považuji za nutné pravidelně provádět měření jednotlivých plastových dílů důslednou kontrolou a včas odhalit případné nežádoucí tolerance, které by následně měly být eliminovány už při lisování těchto dílů.

## Použitá literatura

- [1] Hlaváč, V., Sedláček, M.: *Zpracování signálů a obrazů*. ČVUT FEL, Praha 2000
- [2] Tůma, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. ST, Praha 1997
- [3] Jaksch, I.: *Přednášky - Aplikace analýzy signálů*. TUL
- [4] Brüel&Kjaer: *Návod pro multianalyzátor PULSE*.
- [5] Němeček, P.: *Hluk v technické praxi I*. Technická univerzita v Liberci, 1998
- [6] Kreidl, M.: *Diagnostické systémy*. ČVUT, Praha 1997
- [7] Vdoleček, F.: *Spolehlivost a technická diagnostika*. VUT, Brno 2002
- [8] *Technické články o diagnostice* Dostupné z: <http://www.hw.cz> [cit. 10. března 2006]
- [9] Brüel&Kjaer: *Basic Concepts of Sound*. 1998
- [10] Brüel&Kjaer: *Basic Frequency Analysis of Sound*. 1998
- [11] Brüel&Kjaer: *Vibration Measurement and Analysis*. 1998
- [12] Brüel&Kjaer: *Measuring Sound*. 1984
- [13] Brüel&Kjaer: *Measuring Vibration*. 1982
- [14] Obrázky č. 4, 5, 6, 7, 10 a 11 byly převzaty se serveru [www.bksv.com](http://www.bksv.com).

## Obsah DVD

Obsah přiloženého DVD:

### 1. Dokumentace

- Zdrojový kód diplomové práce ( $\text{\LaTeX}$ )
- Vytvořený pdf dokument

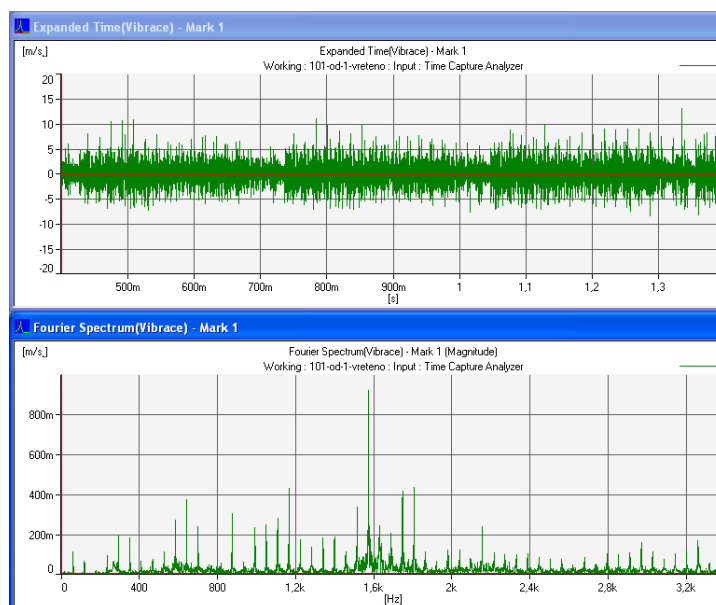
### 2. Data z měření

- Měření bez zátěže
- Měření se zátěží, tvrdá spojka
- Měření se zátěží, středně tvrdá spojka
- Měření se zátěží, měkká spojka
- Měření se zátěží, spojení napevno
- Měření s různým množstvím tuku
- Měření různých částí opěrky
- Měření opěrky s různým napájecím napětím

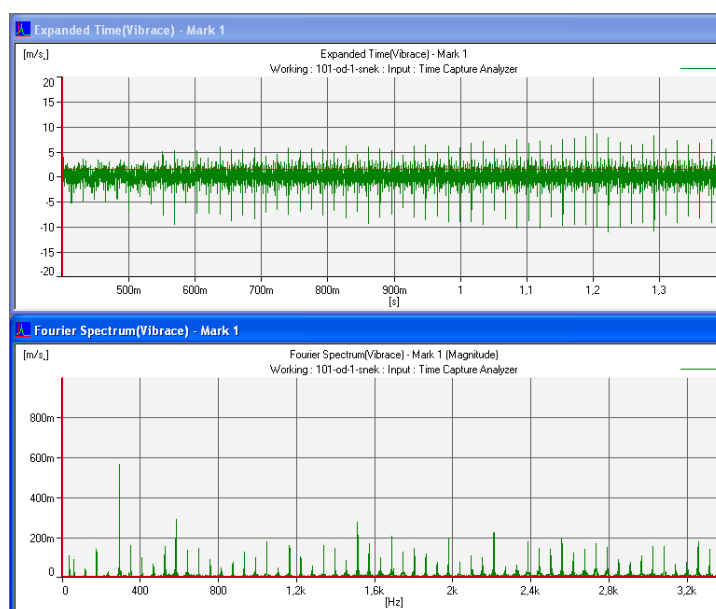


## **PŘÍLOHY**

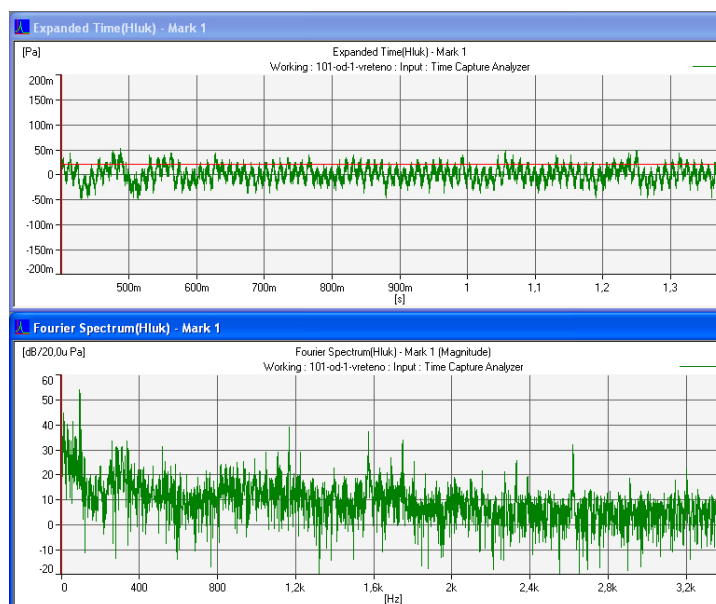
## A Grafy z měření různých částí opěrky



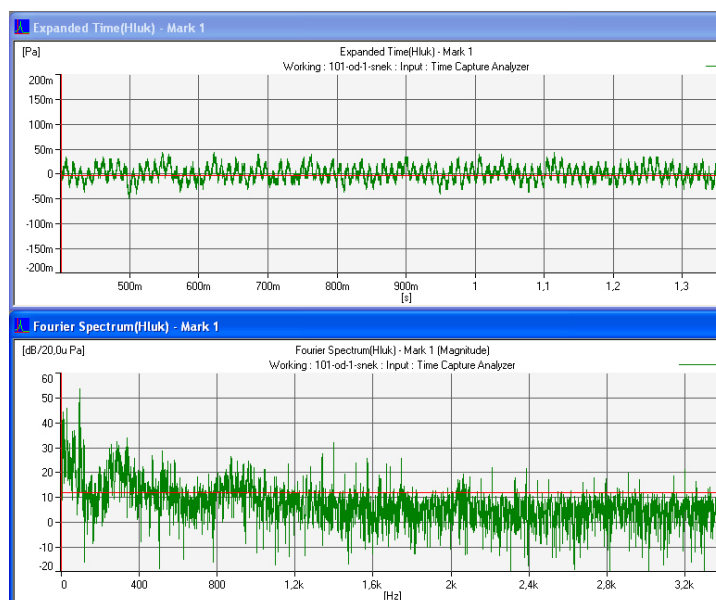
Obrázek 37: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - vřeteno



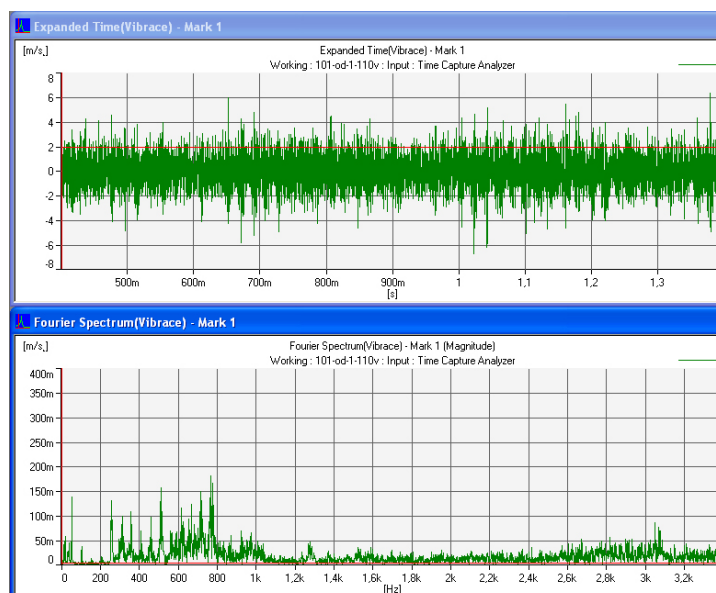
Obrázek 38: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - šnek



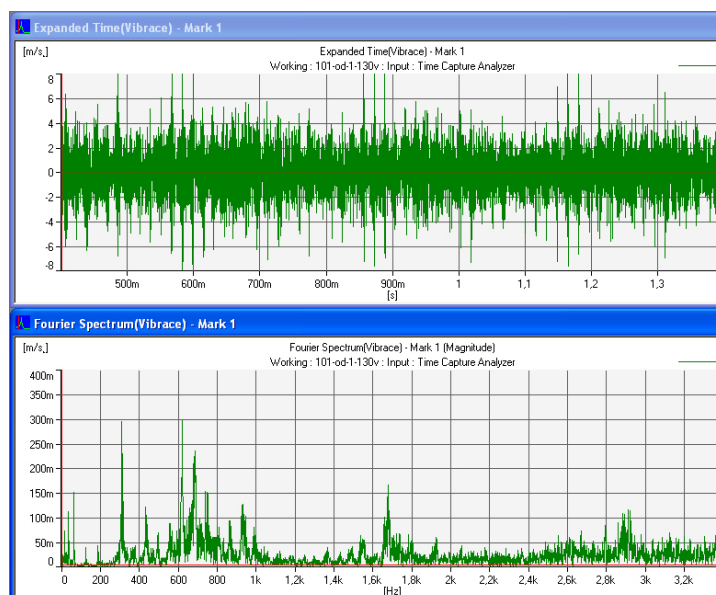
Obrázek 39: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - vřeteno



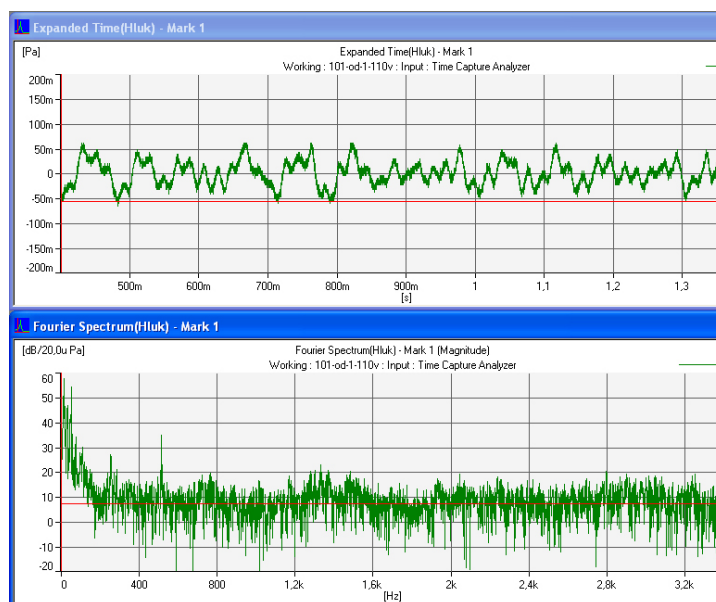
Obrázek 40: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - šnek

**B Grafy z měření opěrek při různém napájecím napětí**

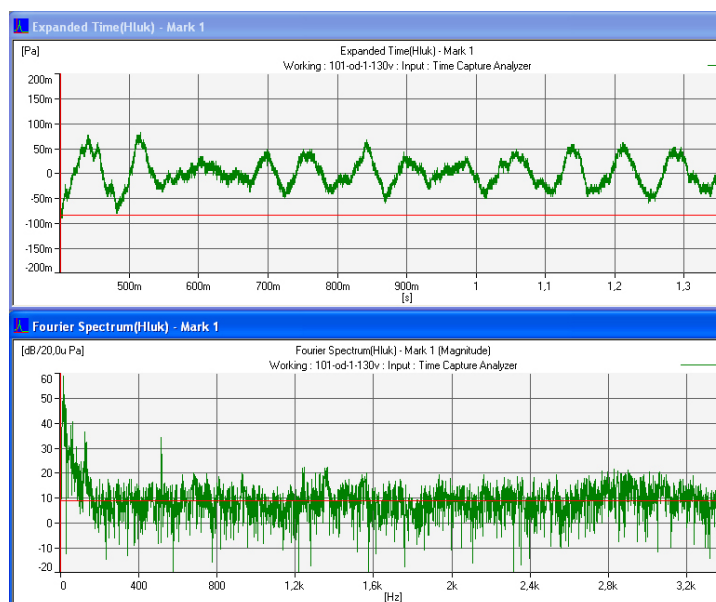
Obrázek 41: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - 11 V



Obrázek 42: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum vibrací - 13 V



Obrázek 43: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - 11 V



Obrázek 44: Časový průběh (horní obrázek) a spektrum hluku - 13 V